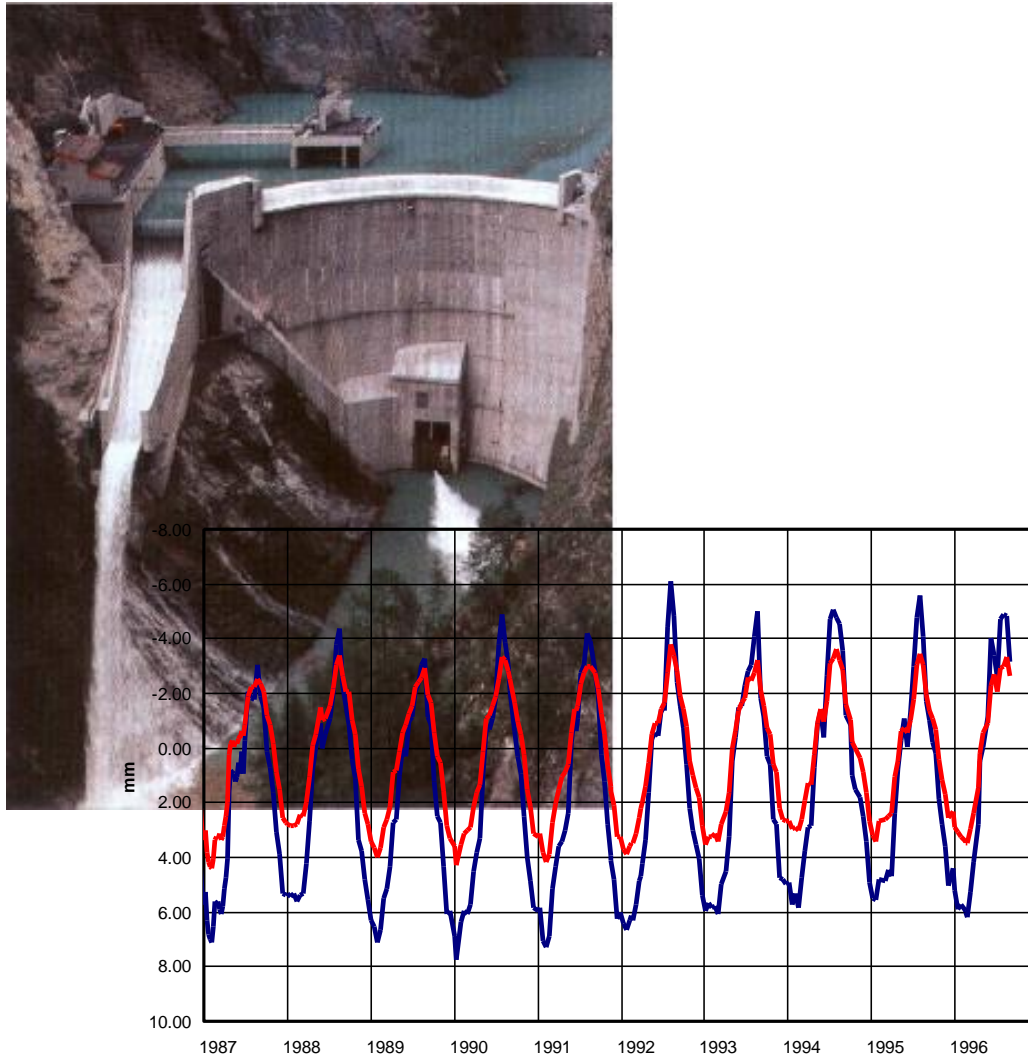




Schweizerisches Talsperrenkomitee
Comité suisse des barrages
Comitato svizzero delle dighe
Swiss Committee on Dams



ANALYSEMETHODEN FÜR DIE VORHERSAGE UND KONTROLLE DES VERHALTENS VON TALSPERREN

Arbeitsgruppe numerische Methoden in der Analyse des Verhaltens von Talsperren

Publikationen des Schweiz. Talsperrenkomitees
Publications du Comité suisse des barrages

Titel – Titre	Jahr Année	Sprache Langue
Bibliographie Suisse des barrages réservoirs Schweizerische Talsperrenbibliographie	1980	D, F
Erdbeben und Talsperren in der Schweiz Séismes et barrages en suisse	1991	D/F
Auftrieb bei Betonsperren	1992	D
Informatik in der Talsperrenüberwachung L'informatique dans la surveillance des barrages	1993	D/F
1980–1996 – Eine Talsperrenepoche – Une époque pour les barrages	1997	D/F
Mesures de déformations géodésiques et photogrammétriques pour la surveillance des ouvrages de retenue	1997	F, E
Zustandsüberwachung von Stauanlagen und Checklisten für die visuellen Kontrollen	1997	D
Surveillance de l'état des barrages et check lists pour les contrôles visuels	1997	F
Le béton des barrages suisses: expériences et synthèse – Concrete of Swiss Dams: Experiences and Synthesis (WEL, 92, pp.205-233)	2000	F, E
Konstruktive Sicherheit der Talsperren – Nutzungsplan und Sicherheitsplan	2000	D/F
Sécurité structurale des barrages – plan d'utilisation et plan de sécurité		
Le béton des barrages suisses	2001	F
Talsperrenmonographie – Empfehlung für die Redaktion Monographie de barrage – Recommandations pour la rédaction Monografia della diga – Raccomandazioni per la redazione	2002	D, F, I
Methods of analysis for the prediction and the verification of dam behaviour (WEL, 95, pp.73-110)	2003	E/F
Dam Monitoring Instrumentation / Dispositif d'auscultation des barrages (WEL, 98, pp 143 – 180) Deutsche Version auf: www.swissdams.ch	2006	E/F

**Preise und Bestellung beim Sekretariat.
Prix et commandes auprès du secrétariat**

© 2010 Schweizerisches Talsperrenkomitee
Comité suisse des barrages
Comitato svizzero delle dighe
Swiss Committee on Dams

Adresse: c/o Stucky SA
33, rue du Lac, case postale
CH-1020 Renens

Fax: +41 (0)21 637 15 08
www.swissdams.ch
Sekretär: bjoos@stucky.ch



GELEITWORT

Die Schweiz besitzt mehr als 150 Talsperren, die gemäss den Kriterien des CIGB/ICOLD als grosse Talsperren bezeichnet werden. Die Mehrzahl davon sind Betonsperren, die zwischen 1930 und 1975 erbaut wurden. Die Kontrolle ihres Verhaltens und die Beurteilung ihrer Sicherheit sind Aufgaben der Besitzer und Betreiber; sie werden unter der Aufsicht des Bundes im Rahmen der Bundesverordnung über die Sicherheit von Talsperren durchgeführt. Diese Kontrollen finden normalerweise monatlich statt; die Resultate werden in Jahresberichten und Fünfjahresberichten zusammengefasst.

Die Voraussage der Messergebnisse, das Analysieren des Langzeitverhaltens und das Beurteilen der Einflussparameter sind ständige Aufgaben der Verantwortlichen sowie der Experten, die sich mit der Sicherheit des Bauwerks beschäftigen.

Aufgrund der im Laufe der Jahre gesammelten Erfahrungen sind verschiedene Verhaltensmodelle entwickelt worden. Es zeigt sich, dass nicht immer alles erklärt, normalisiert und mit einer einzigen Methode — sei es deterministisch oder statistisch — vereinheitlicht werden kann. Die Wahl der Methode, der zu verwendenden Variablen und der zu berücksichtigenden Formeln unterscheiden sich je nach Sperre und je nach den vorliegenden Informationen, die aus mehr oder weniger komplexen Untersuchungen stammen. Der Ingenieur muss jede Situation und jede Sperre einzeln beurteilen. Er bleibt die Schlüsselperson bei der Wahl des Verhaltensmodells.

Die Arbeitsgruppe „Numerische Methoden in der Verhaltensanalyse von Talsperren“ des Schweizerischen Talsperren-Komitees hat den Versuch unternommen, die in der Schweiz gesammelten Erfahrungen und die verwendeten Ansätze im vorliegenden Bericht zusammenzufassen. Dabei werden der Einfluss der Parameter und Variablen dieser Analysemethoden dargestellt, deren Vor- und Nachteile beschrieben und geeignete Vereinfachungen — welche zu weniger komplexen, noch interpretierbaren Formeln führen — aufgezeigt. In letzter Instanz muss sich aber der Ingenieur aufgrund seiner eigenen Interpretationen zur Sicherheit des Bauwerks äussern.

Ein Vergleich der verschiedenen Verhaltensmodelle, einige Anwendungsbeispiele und eine Übersicht über neuere Methoden ermöglichen es, den gegenwärtigen Wissenstand in der Schweiz aufzuzeigen.

Wir hoffen, dass dieser Bericht einen Beitrag zur Diskussion über den Soll-Ist-Vergleich des Verhaltens von Talsperren leistet. Es zeigt sich, dass eine Voraussage auf der Basis eines statistischen oder deterministischen Modells immer nur eine Extrapolation der Vergangenheit sein kann und immer nur eines von vielen Elementen ist, die bei der Beurteilung der Sicherheit einer Talsperre berücksichtigt werden müssen.

Für das Schweizerische Talsperrenkomitee

Bernard Hagin, Präsident



INHALTSVERZEICHNIS

GELEITWORT	1
INHALTSVERZEICHNIS	2
VORWORT	4
BEZEICHNUNGEN	5
1. EINLEITUNG	8
1.1 Ziel	8
1.2 Geltungsbereich	8
1.3 Inhalt	9
2. ALLGEMEINE FORMULIERUNG DES PROBLEMS	10
2.1 Methodik	10
2.2 Massgebende Variablen	11
2.3 Grundformel	12
2.4 Deterministische, statistische, hybride und gemischte Modelle	14
3. MODELLIERUNG DES VERHALTENS VON BETONTALSPERREN	17
3.1 Deterministische und hybride Modelle zur Voraussage von Verschiebungen	17
3.2 Statistisches Modell zur Voraussage von Verschiebungen	25
3.3 Funktionen für die statistische Modellierung anderer Situationen	31
3.4 Verwendung von gemischten Modellen	33
4. EINFÜHRUNG DER STATISTISCHEN METHODE	35
4.1 Vorgehen	35
4.2 Schätzung der Parameter: Mehrfache Regression mit der Methode der kleinsten Quadrate	35
4.3 Gültigkeit eines Modells: Statistische Tests	38
4.4 Zulässige Abweichungsbereiche	39
4.5 Plausibilität	39
4.6 Bemerkung zur Verwendung der Statistik in der Praxis	40
5. DARSTELLUNG DES VERGLEICHS	41
5.1 Beobachtung	41
5.2 Beobachtungen und Voraussagen	41
5.3 Kompensierte Verschiebungen oder Vergleichsverformungen	41
5.4 Zusammenfassung	43
6. NEUE METHODEN	45
6.1 Neuronennetz	45
6.2 Mathematical Model of Multiple Survey Points	46



6.3	Kalman-Filter	46
7.	SCHLUSSBEMERKUNGEN	47
7.1	Vergleich der Methoden	47
7.2	Computer-Programme	47
7.3	Kommentar	47
7.4	Empfehlungen für die Anwendung	48
7.5	Synthese	49
8.	ANWENDUNGSBEISPIELE	51
8.1	Deterministische und hybride Methode (Gewichtsmauer Robiei)	52
8.2	Statistische Methode (Gewichtsbogenmauer Spitalamm)	55
9.	REFERENZEN	60



VORWORT

Die Abweichung des effektiven Verhaltens einer Talsperre vom theoretischen Verhalten kann der Vorbote eines abnormalen Verhaltens sein. Deshalb hat die Beherrschung der hier beschriebenen Analysemethoden, welche in der Schweiz übrigens schon seit vielen Jahren angewendet werden, eine entscheidende Bedeutung.

Das Auftreten einer neuen Generation von Talsperreningenieuren, die bei der Entwicklung dieser Analysemethoden nicht mitgewirkt haben, macht deren Aufzeichnung notwendig und ermöglicht gleichzeitig ihre Bewertung auf Grund der gemachten Erfahrungen. Dies ist das Ziel des vorliegenden Berichtes.

Der Bericht konzentriert sich auf den Soll-Ist-Vergleich. Es wird aber daran erinnert, dass dieser Vergleich – wie wichtig er auch sein mag – nur ein Werkzeug unter vielen im fortlaufenden Prozess der Talsperrenüberwachung und der Sicherheitsbeurteilung ist. Es wird ebenfalls daran erinnert, dass der Zustand und das Verhalten einer Talsperre nur durch den Menschen richtig eingeschätzt werden kann, der auch die richtigen Entscheide treffen muss. Wie „mathematisch“ die Betrachtungen in diesem Bericht auch sein mögen, die zentrale Rolle des sachkundig entscheidenden Ingenieurs können sie nicht ersetzen. Die Informatik kann diese Rolle keinesfalls übernehmen.

Der vorliegende Bericht wurde durch die Arbeitsgruppe „Numerische Methoden in der Verhaltensanalyse von Talsperren“ des Schweizerischen Talsperrenkomitees erarbeitet. Folgende Personen haben dabei mitgewirkt:

<i>Walter Amberg</i>	Lombardi SA, Ingegneri Consulenti, Minusio
<i>Eduard Ammann</i>	IM Ingegneria Maggia SA, Locarno
<i>Dr. Claude Bossoney</i>	Stucky Ingénieurs-conseils SA, Renens
<i>Dr. Georges R. Darbre, Präsident</i>	Bundesamt für Wasser und Geologie, Biel
<i>Dr. Patrice Droz</i>	Stucky Ingénieurs-conseils SA, Renens
<i>Dr. Russell M. Gunn</i>	Stucky Ingénieurs-conseils SA, Renens
<i>Dr. Walter Hauenstein</i>	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, Baden
<i>Bernard Hagin</i>	Energie Ouest Suisse SA, Lausanne
<i>Alfred Kobelt</i>	Bundesamt für Wasser und Geologie, Biel
<i>Dr. Sujan Malla</i>	Electrowatt-Ekono AG, Zürich
<i>Christian Moor</i>	Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Baden
<i>René Schmidiger</i>	Electrowatt-Ekono AG, Zürich
<i>Felix Steiger</i>	F. Steiger Beratender Ingenieur, Zürich
<i>Karl M. Steiger</i>	Colenco Power Consulting AG, Baden
<i>Frau Sener Tiniç</i>	Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Baden
<i>Dr. Benedikt Weber</i>	Beratender Ingenieur, Zumikon
<i>Dr. John-P. Wolf</i>	Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne



BEZEICHNUNGEN

Symbole

<i>A</i>	Koeffizient
<i>B</i>	Koeffizient
<i>C</i>	Konstante
<i>D</i>	Grenzwert, zulässige Abweichung
<i>E</i>	Eulersche Zahl (Basis des natürlichen Logarithmus)
<i>F</i>	Formfunktion
<i>H</i>	Wasserspiegellage
<i>N</i>	Anzahl Messungen, Anzahl Beobachtungen
<i>P</i>	Anzahl Einflussfunktionen, Anzahl unabhängige Variablen; hydrostatischer Druck
<i>R</i>	Einflussfaktor; Steifigkeitsverhältnis
<i>s</i>	Einflussfaktor; Jahreszeit (dimensionsloser Tag)
<i>t</i>	Zeit, Zeitpunkt, Alter
<i>x</i>	Variable; Wert der Funktion <i>X</i> ; Koordinaten-Komponente
<i>y</i>	Funktion; Wert der Funktion <i>Y</i> ; Koordinaten-Komponente
<i>z</i>	Koordinaten-Komponente
<i>D</i>	Differenz oder Abweichung zwischen Messung und Voraussage
<i>E</i>	Elastizitätsmodul
<i>E()</i>	Erwartungswert
<i>F</i>	Last
<i>H</i>	Einheits-Sprungfunktion Talsperrenhöhe
<i>K</i>	Obere Grenze des Indizes <i>k</i>
<i>L</i>	Obere Grenze des Indizes <i>l</i> ; Grad eines Polynoms
<i>M</i>	Messwert eines Verhaltensindikators
<i>P</i>	Voraussagewert eines Verhaltensindikators
<i>Q</i>	Durchflussmenge
<i>R</i>	Steifigkeitsverhältnis (anpassbarer Parameter)
<i>R²</i>	Bestimmtheitsmass



U	Verformung
X	Einflussfunktion; unabhängige Variable; anpassbarer Parameter
Y	Einflussfunktion; abhängige Variable anpassbarer Parameter
Z	anpassbarer Parameter
α	unabhängiger Parameter, Koeffizient
β	unabhängiger Parameter, Koeffizient
δ	Verschiebung
ε	Fehler, Residuum
φ	Kriechfunktion
π	Zahl Pi
ν	Poisson-Konstante
τ	Zeit (variabel)
σ	Standardabweichung
Δ	Inkrement, Variation
θ	Temperatur
<i>corr</i>	Korrelation
<i>cos</i>	Kosinus
<i>cov</i>	Kovarianz
c^{ste}	Konstante
<i>env</i>	Umweltbedingungen
<i>ln</i>	Natürlicher Logarithmus
<i>log</i>	Logarithmus zur Basis 10
<i>sin</i>	Sinus
<i>var</i>	Varianz
$ $	Absoluter Wert
$_$	Matrix, Vektor
$\sqrt{\quad}$	Wurzel
Σ	Summe
\int	Integral
$\frac{d}{dt}$	Ableitung bezüglich der Zeit



Indizes

<i>c</i>	Beton
<i>d</i>	abgeleitet
<i>h</i>	hydrostatisch
<i>i</i>	momentan; i-ter Wert, i-te Funktion
<i>j</i>	j-ter Wert, j-te Funktion
<i>k</i>	k-ter Wert, k-te Funktion
<i>l</i>	l-ter Wert
<i>m</i>	m-ter Wert
<i>r</i>	reversibel; Foundation; Steifigkeitsverhältnis
<i>s</i>	irreversibel
<i>F</i>	Kriechen
<i>T</i>	transponiert
<i>θ</i>	thermisch
<i>0</i>	initial, null, Bezug
<i>*</i>	Näherung
<i>—</i>	Mittel
<i>^</i>	Schätzung



1 Einleitung

1.1 Ziel

Der Vergleich des tatsächlichen Verhaltens einer Talsperre mit dem erwarteten Verhalten hat zum Ziel, zu kontrollieren, ob dieses den Voraussagen entspricht. Dies erlaubt es, eine allfällige Abweichung, welche Vorbote eines abnormalen Verhaltens sein kann, frühzeitig zu erkennen. Um einen solchen Vergleich durchführen zu können, muss neben der Messung eine Voraussage des *konformen* („normalen“) Verhaltens der Talsperre zur Verfügung stehen, eine Voraussage, die nicht notwendigerweise identisch mit dem *effektiven Verhalten* des Bauwerks sein muss.

Der Standpunkt ändert sich, wenn es darum geht, dem Sperrenwärter für eine durchzuführende Messung einen wahrscheinlichen Wert und den entsprechenden Toleranzbereich vorauszusagen. Die Messung muss innerhalb dieses Toleranzbereiches liegen, damit sie als korrekt (oder zumindest als nachvollziehbar) betrachtet und akzeptiert werden kann. In diesem Zusammenhang schliesst die Voraussage auch die allfällige „abnormale“ oder pathologische Komponente des Verhaltens ein.

Diese zweite Anwendung wird im vorliegenden Bericht nicht ausdrücklich behandelt. Die Grundlagen sind jedoch dieselben.

1.2 Geltungsbereich

Der Soll-Ist-Vergleich wird meistens mit dem Ziel erstellt, das aktuelle Verhalten der Talsperre zu analysieren. Ein solcher Vergleich wird ebenfalls beim Ersteinstau durchgeführt (mit dem Ziel, das gute Anfangsverhalten des Bauwerks nachzuweisen).

Für diesen Vergleich sind folgende Elemente erforderlich:

- a) Messungen des Verhaltens,
- b) Berechnungen des Verhaltens,
- c) Bewertungskriterien für den Vergleich.

Der vorliegende Bericht behandelt die Punkte *b* und *c*. Auf Punkt *a* wird hier nicht eingegangen, da dieser in den STK-Publikationen zur Talsperrenüberwachung behandelt wird (siehe CNSGB-ICOLD/CIGB (1987, 1993, 1997a, 1997b)).

Die Anwendbarkeit der Methode ist nicht begrenzt, weder in Bezug auf den Typ der Talsperre, noch auf die verwendeten Verhaltensindikatoren, ausser dass diese mit ausreichender Präzision gemessen werden können. Unter *Verhaltensindikator* ist eine physikalische Grösse zu verstehen, welche für einen Aspekt des Verhaltens der Talsperre repräsentativ ist, und welche mit einer Einrichtung gemessen werden kann.

In der Schweiz werden gegenwärtig vor allem Bogentalsperren einem Soll-Ist-Vergleich unterzogen. Gewichtsstaumauern sind weniger oft Gegenstand einer solchen Untersuchung. Bei Dämmen und Wehren wird sie nur in Ausnahmefällen angewendet. Kleine Talsperren sind selten Gegenstand eines Soll-Ist-Vergleichs. Normalerweise sind die Radialverschiebungen (oder Berg-Tal-Verschiebungen) eines oder mehrerer Punkte die Verhaltensindikatoren, für welche ein solcher Vergleich durchgeführt wird. Andere Verhaltensindikatoren wie Tangentialverschiebungen (Verschiebung rechte-linke Flanke), Auftrieb, Sicker- oder Drainagewassermenge,



Porenwasserdruck, Bewegungen der Blockfugen und Verformungen der Foundation sind seltener Objekt eines Soll-Ist-Vergleichs.

Phänomene wie eine Auflagerverschiebung oder eine Alkali-Aggregat-Reaktion (die ein Quellen des Betons bewirkt) werden dagegen kaum einem Soll-Ist-Vergleich unterzogen. Einerseits sind diese Phänomene normalerweise schwer zu quantifizieren, und andererseits entstehen sie „zufällig“. Oft werden sie durch bedeutende Abweichungen zwischen der Voraussage und den Messungen eines Verhaltensindikators identifiziert. Ist ein solches Phänomen einmal nachgewiesen worden, kann seine Entwicklung durch regelmässige Überprüfung der Abweichungen verfolgt werden.

1.3 Inhalt

Die allgemeine Formulierung des Vergleiches zwischen gemessenen und berechneten Werten wird im Kapitel 2 erläutert; die Grundsätze der Methode, die massgebenden Variablen, das allgemeine Modell und die gebräuchlichen Ansätze (deterministisch, statistisch, hybrid und gemischt) werden dargestellt. Die zur Voraussage des Verhaltens verwendeten Einflussfunktionen werden im Kapitel 3 beschrieben. Das Kapitel 4 analysiert die numerische Lösungsermittlung und widmet dabei der Statistik besondere Aufmerksamkeit. Das Kapitel 5 behandelt die Darstellung des Vergleichs zwischen Messung und Voraussage. Neue Vergleichsmethoden — Neuronennetz, Mathematical Model of Multiple Survey Points (Mathematisches Model mit gekoppelten Kontrollpunkten) und Kalman-Filter — sind Gegenstand des Kapitels 6. Eine Gegenüberstellung der zuvor behandelten Modelle, die Identifikation von Wissenslücken sowie Ratschläge zur Anwendung werden im Kapitel 7 gegeben. Darauf folgen im Kapitel 8 zwei Anwendungsbeispiele und schliesslich im Kapitel 9 die Liste der Referenzen.

Mit Ausnahme der Abschnitte 3.1 und 3.2, die speziell die Verformung von Beton-Talsperren behandeln, gelten die Ausführungen in diesem Bericht für alle Talsperrentypen und für alle Verhaltensindikatoren.



2 Allgemeine Formulierung des Problems

2.1 Methodik

Die Methode vergleicht die gemessenen Werte M eines Verhaltensindikators mit den Werten P desselben Indikators, die mit Hilfe eines Verhaltensmodells vorausgesagt worden sind. Die Messung wird zu einem Zeitpunkt t durchgeführt, und die Voraussage wird auf der Basis der Umweltbedingungen env für denselben Zeitpunkt t gemacht. Unter *Umweltbedingungen* versteht man die Werte einer gewissen Anzahl von physikalischen Grössen, die den analysierten Einflussfaktor beeinflussen. Diese Umweltbedingungen, die ebenfalls gemessen werden, beziehen sich entweder auf den Zeitpunkt t der Messung des Verhaltenindikators oder auf einen vorangehenden Zeitpunkt (oder Periode), falls sie den Verhaltensindikator zeitverschoben beeinflussen.

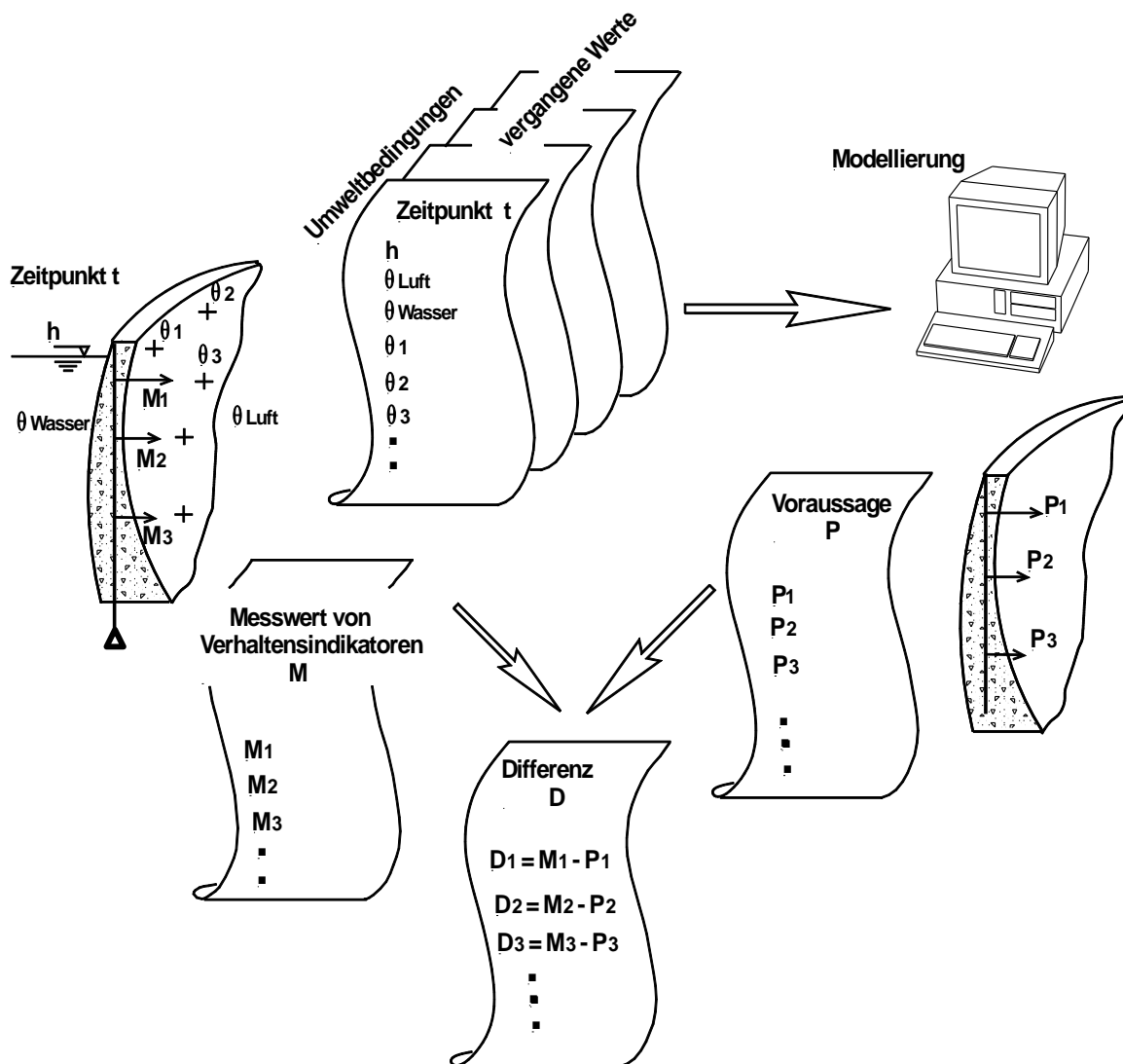
Was den Begriff *vorausgesagte Werte* betrifft, muss betont werden, dass es sich dabei eigentlich um einen missbräuchlichen Ausdruck handelt wie er vor allem in der Statistik verwendet wird. Die vorausgesagten Werte sind eigentlich Werte, welche mit dem Verhaltensmodell auf der Basis von bekannten oder als bekannt angenommenen Umweltbedingungen berechnet wurden.

Bei der Interpretation einer bestehenden Serie von Messwerten wird versucht, das gemessene Verhalten der Talsperre voraus zu sagen, zu kontrollieren oder mathematisch zu erklären. Wenn der Sperrenwärter den eben gemessenen Wert kontrollieren oder den ungefähren Wert der zu messenden Grösse kennen will, gibt ihm das Verhaltensmodell eine „Voraussage“, die sich auf den entsprechenden Zeitpunkt bezieht.

Folgendes sind dabei die wesentlichen Aufgaben:

- a) die Wahl der Umweltfaktoren, die das Verhalten der Talsperre beeinflussen (massgebende Variablen);
- b) die Berechnung der Voraussage.

Wenn diese Aufgaben gelöst sind, können die Werte M und P verglichen werden und daraus die entsprechenden Folgerungen für das Verhalten – in der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft – der Talsperre gezogen werden. Dieser Prozess wird in der Figur 1 dargestellt.



Figur 1 – Prinzip des Soll-Ist-Vergleichs.

2.2 Massgebende Variablen

Verschiedene physikalische Grössen bestimmen das Verhalten einer Talsperre. Sie hängen vom Typ der Talsperre und den lokalen Umständen ab. Die physikalischen Grössen, deren Variation eine wesentliche Veränderung des Verhaltensindicators bewirken, werden hier als *massgebende Variablen* definiert. Damit es Sinn macht, sie im Verhaltensmodell zu berücksichtigen, müssen sie während der Lebensdauer des Bauwerks auch variieren.

Es ist allgemein bekannt, dass das Verhalten einer Talsperre hauptsächlich von den folgenden Variablen beeinflusst wird:

- Wasserstand h ,
- Betontemperatur θ (abhängig von der Luft- und Wassertemperatur),
- Alter des Bauwerks t (seit der Fertigstellung verlossene Zeit).



Andere Faktoren – wie zum Beispiel die Feuchtigkeit des Betons – beeinflussen das Verhalten der Talsperre nur marginal (sei dies auf Grund der Natur des Phänomens oder auf Grund der kleinen Werteveriationen), oder hängen – wie z.B. der das Verhalten der Talsperre beeinflussende Auftrieb – selbst von den vorangehend angegebenen Variablen ab.

2.3 Grundformel

Die Grundformel sieht folgendermassen aus (Willm & Beaujoint 1967, Breitenstein et al. 1985):

$$M(t, env) = P(t, env) + D(t, env) \quad [1]$$

M ist der gemessene Wert des Indikators zum Zeitpunkt¹ t (bei dem die aus h und θ bestehenden Umweltbedingungen env herrschen), P ist die Voraussage desselben Indikators und D ist die Differenz (oder Abweichung) zwischen Messung und Voraussage. Die Differenz D setzt sich dabei aus Messfehlern, aus Modellierungsfehlern und aus der Abweichung des effektiven Verhaltens der Talsperre vom erwarteten Verhalten zusammen. In der Praxis werden diese drei Komponenten aber nicht getrennt behandelt.

2.3.1 Formel mit Trennung der reversiblen und irreversiblen Einflüsse

Die Gleichung 1 kann durch Trennen der reversiblen und irreversiblen Einflüsse neu formuliert werden. Wenn als massgebende Variablen nur der Wasserstand h , die Betontemperatur θ und das Alter² t der Sperre berücksichtigt werden, schreibt sich die Gleichung 1 wie folgt:

$$M(t, env) = P_{h,r}(t, h) + P_{\theta,r}(t, \theta) + P_s(t, h, \theta) + D(t, env) \quad [2]$$

$P_{h,r}(t, h)$ ist die reversible hydrostatische Komponente und $P_{\theta,r}(t, \theta)$ die reversible temperaturabhängige Komponente. Zusammen ergeben diese zwei Terme die reversiblen Einflüsse $P_r(t, env)$:

$$P_r(t, env) = P_{h,r}(t, h) + P_{\theta,r}(t, \theta) \quad [3]$$

Die Grösse $P_s(t, h, \theta)$ steht für die irreversible Komponente.

Die reversible hydrostatische Komponente $P_{h,r}(t, h)$ und die reversible temperaturabhängige Komponente $P_{\theta,r}(t, \theta)$ sind nicht nur vom Wasserstand bzw. der Temperatur der Talsperre abhängig, sondern auf Grund der verzögerten Einflüsse auch von der Zeit (Alter der Sperre).

2.3.2 Formel mit Trennung der instantanen und verzögerten Einflüssen

Eine alternative Formel liefert die Aufteilung der Voraussage des Verhaltenindikators in eine instantane Komponente $P_i(env)$

$$P_i(env) = P_{h,i}(h) + P_{\theta,i}(\theta) \quad [4]$$

¹ In diesem Bericht werden der Zeitpunkt und das Alter mit der gleichen Variablen t bezeichnet. Damit dies zulässig ist, wird der Nullpunkt bei der Fertigstellung oder Inbetriebnahme der Talsperre angesetzt.

² Siehe Fussnote 1.



die (theoretisch) nur vom Wasserstand $P_{h,i}(h)$ und von der Temperatur $P_{\theta,i}(\theta)$ abhängt, und eine verzögerte Komponente $P_d(t,h,\theta)$, die vom Alter und von der Belastungsgeschichte (Wasserstand und Temperatur) abhängt:

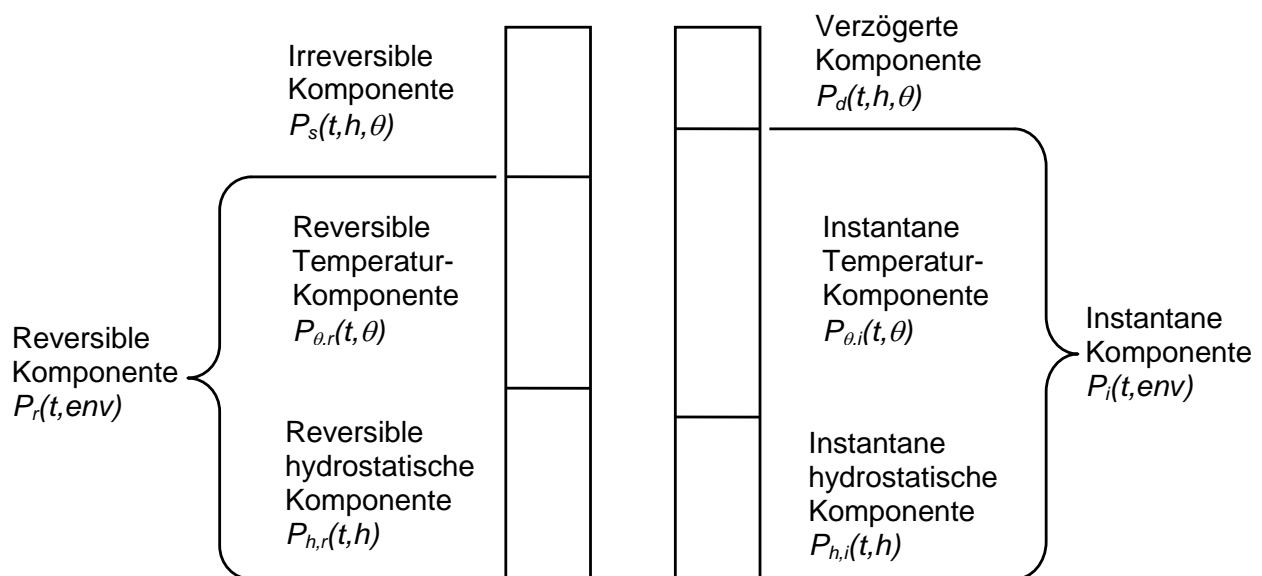
$$M(t, env) = P_{h,i}(h) + P_{\theta,i}(\theta) + P_d(t, h, \theta) + D(t, env) \quad [5]$$

Die zeitliche Veränderung der Materialeigenschaften beeinflusst die instantane Komponente ebenfalls. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass die Talsperre auf zwei identische, aber zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftretende Belastungen nicht gleich reagiert. In der Praxis wird dies normalerweise aber nicht berücksichtigt.

2.3.3 Hypothesen

Die beiden vorangehend angegebenen Formeln, die schematisch in der Figur 2 dargestellt sind, basieren auf den folgenden Hypothesen:

- die Variablen Zeit (Alter), Wasserstand und Temperatur genügen, um das Verhalten der Talsperre darzustellen und zu erklären;
- es ist möglich, die Einflüsse der Temperatur und des Wasserstandes zu trennen³;
- die Struktur des analysierten Systems erfährt während der analysierten Periode keine nennenswerten Veränderungen⁴.



Figur 2 – Auftrennen der Voraussage von Verhaltensindikatoren.
Links: durch Trennen der reversiblen und irreversiblen Einflüsse.
Rechts: durch Trennen der instantanen und verzögerten Einflüsse.

³ Die Betontemperatur wird aber durch die Temperatur des Wassers beeinflusst und folglich auch durch den Wasserstand.

⁴ Das Erkennen möglicher Strukturveränderungen am System ist ein Ziel des Vergleiches.



In der Folge geht es darum, funktionelle Beziehungen zwischen den Komponenten der Verhaltensindikatoren und den entsprechenden massgebenden Variablen zu erstellen. Dies geschieht normalerweise mit Hilfe eines *deterministischen, statistischen, hybriden* oder *gemischten* Modells.

2.4 Deterministische, statistische, hybride und gemischte Modelle

Für die Voraussage von Variablen (Verhaltensindikatoren) auf der Basis von Messwerten anderer Variablen (massgebende Variablen) stehen zwei Grundmethoden zur Verfügung:

- a. die *deterministische Methode*, welche Ursachen (Wasserstand, Alter, Temperatur,...) und beobachtete Auswirkungen (Verformungen, Auftrieb,...) gestützt auf physikalische Gesetze verbindet;
- b. die *statistische Methode*, welche diese Verbindung nur auf empirische oder numerische Weise herstellt, d.h. gestützt auf eine vorhandene Serie von Messwerten des Verhaltensindikators und der massgebenden Variablen.

Neben diesen zwei Grundmethoden existieren noch die *hybride* und die *gemischte Methode*. Sie gehen jeweils aus einer Kombination der beiden Grundmethoden hervor.

Bei der Verwendung der verschiedenen Methoden können unterschiedliche Modellierungen berücksichtigt werden, insbesondere durch die Wahl der massgebenden Variablen, des geometrischen Modells, der Materialverhaltensgesetze sowie durch die Art der Verbindung zwischen den Verhaltens-Indikatoren und den massgebenden Variablen.

2.4.1 Deterministische Modelle

Die Geometrie des analysierten Gebietes (d.h. Talsperre, Foundation und Stausee) sowie die mechanischen, thermischen und chemischen Prozesse werden mit einem mathematischen Modell wiedergegeben. Typischerweise handelt es sich dabei um ein Finite-Element-Modell, dessen Materialgesetze das Verhalten der Staumauer und der Foundation nachbilden.

Die Qualität der Verhaltensvoraussage hängt von den folgenden Punkten ab:

- a. Güte der Modellierung;
- b. Fähigkeit der gewählten Materialgesetze, das effektive Verhalten zu beschreiben;
- c. Kenntnis der Parameter, die in die Verhaltensgesetze eingehen (z.B. Elastizitätsmodul);
- d. Vereinfachungen bei der Modellierung, insbesondere bei den Verhaltensgesetzen und den Randbedingungen;
- e. Vereinfachungen bei der mathematischen Berechnung.

Zuerst werden für einige unterschiedliche Werte der massgebenden Variablen h und θ diskrete Werte der Verhaltensindikatoren berechnet. Anschliessend werden daraus die den Variablen h und θ zum Zeitpunkt t entsprechenden Werte der Verhaltensindikatoren interpoliert, und gegebenenfalls um die verzögerten und irreversiblen Einflüsse korrigiert.

Die Qualität der Voraussage hängt damit auch von den folgenden Punkten ab:



- f. Anzahl Wertekombinationen der massgebenden Variablen, für welche man die diskreten Werte der analysierten Verhaltensindikatoren berechnet (Auflösung und Ausdehnung des Interpolationsraumes);
- g. Qualität der Interpolation.

Das wesentliche Kennzeichen eines deterministischen Modells besteht darin, dass es sich nicht auf Messungen der Verhaltensindikatoren stützt, die zur Kalibrierung des Modells benützt werden könnten. Auf Grund dieser Tatsache ist man normalerweise gezwungen, die Modellparameter aus unvollkommenen Kenntnissen des modellierten Gebietes zu bestimmen (punktuelle Messungen, Bohrungen, Proben aus Bohrkernen, Plattendruckversuche in Stollen, usw.). Ein deterministisches Modell ist aber der einzig mögliche Ansatz zur Analyse des Ersteinstaus und der ersten Betriebsjahre.

Deterministische Modelle werden zudem fast ausschliesslich zur Berechnung von Verschiebungen benützt. Die Berechnung anderer Verhaltensindikatoren, wie z.B. die Sickerwassermenge oder der Auftrieb, werden nicht mit Modellen dieser Art berechnet, da die physikalischen Zusammenhänge zu wenig bekannt oder zu komplex sind.

2.4.2 Statistische Modelle

Anstatt die deterministischen Beziehungen durch Modellieren eines Phänomens zu beschreiben, können die Gesetzmässigkeiten gestützt auf Erfahrungen aus vergangenen Messungen *a priori* angenommen werden. Man wählt dazu mathematische Funktionen, die den Einfluss der massgebenden Variablen möglichst gut beschreiben; sie werden als *Prognosefunktionen* oder *Prognosen* bezeichnet. Diese Prognosefunktionen werden mit *Koeffizienten multipliziert*, die durch eine statistische Kalibrierung – in der Regel eine lineare Regressionsanalyse – bestimmt werden. Die Kalibrierung stützt sich auf die vergangenen Messungen der Verhaltensindikatoren und der massgebenden Variablen.

Die allgemeine Formel hat die folgende Form:

$$P = \beta_0 + \sum_{j=1}^p X_j \beta_j \quad [6]$$

worin P die Voraussage des Indikators angibt, X_j die j -te zur massgebenden Variablen gehörende Prognosefunktion (total p Prognosefunktionen) ist und β_j den dazugehörenden Kalibrierungskoeffizienten bezeichnet. Diese Koeffizienten werden normalerweise durch Minimierung der Differenz D zwischen der Messung M und der Voraussage P während einer vorangehenden Kalibrierperiode bestimmt (d.h., die Gleichung 6 wird für eine lange Messreihe des Verhaltensindikators und der massgebenden Variablen mit nachfolgender Minimierung der Summe der Quadrate der Differenzen zwischen Voraussage und Messung angewendet).

Statistische Modelle sind sehr allgemein und können für ganz unterschiedliche Phänomene verwendet werden. Es ist aber wichtig, über eine genügend grosse Anzahl von Messungen zu verfügen, die auch den üblicherweise auftretenden Variationsbereich der massgebenden Variablen umfasst. Dies ist erst mehrere Jahre nach dem Ersteinstau der Fall (siehe nachfolgenden Abschnitt 4.2). Die Voraussage des Verhaltens einer Talsperre bei aussergewöhnlichen Variationen der massgebenden Variablen infolge Entleerung des Staubeckens, extremes Hochwasser, Änderung der Bewirtschaftungsart usw. ist oft recht ungenau.



2.4.3 Hybride Modelle

Die so genannten *hybriden Modelle*, manchmal auch als *angepasste deterministische Modelle* bezeichnet, kombinieren die grundsätzlichen Eigenschaften der deterministischen und der statistischen Modelle. Die aus der Modellierung des Talsperrensystems abgeleiteten funktionellen Beziehungen (wie im Abschnitt über die deterministischen Modelle beschrieben) werden dabei als Prognosefunktionen verwendet. Sie werden durch Kalibrierungs-Koeffizienten ergänzt (wie im Abschnitt zu den statistischen Modellen beschrieben).

Ein hybrides Modell kann folglich als ein deterministisches Modell mit statistischer Anpassung der Parameter beschrieben werden, oder als ein statistisches Modell mit Einflussfunktionen, die aus der physikalischen Modellierung des Talsperrensystems abgeleitet worden sind.

2.4.4 Gemischte Modelle

Während der Einfluss des Wasserstandes auf das Verhalten einer Talsperre verhältnismässig leicht mit einem deterministischen Modell vorausgesagt werden kann, ist dies für den Einfluss von Temperaturvariationen nicht der Fall. Deshalb sind in der Praxis auch so genannte *gemischte Modelle*⁵ gebräuchlich, bei denen der Einfluss des Wasserstandes deterministisch und der Einfluss der Temperatur statistisch modelliert werden. Falls im Modell Alterungsprozesse (Langzeiteinflüsse) berücksichtigt werden sollen, werden sie ebenfalls statistisch modelliert.

2.4.5 Beziehung zwischen den verschiedenen Modellen

Zwei Eigenschaften charakterisieren die vorangehend beschriebenen Modelle: Einerseits handelt es sich um den verwendeten mathematischen Ansatz, mit dem das Verhalten der Talsperre beschrieben wird (*Einflussfunktion*); andererseits geht es um das Vorhandensein oder Fehlen einer Kalibrierung der Voraussagefunktionen (durch statistische Bearbeitung der vorhandenen Messungen).

Die deterministischen Modelle sind durch das Verwenden von Einflussfunktionen, die auf einer physikalischen Modellierung basieren, und das Fehlen einer Kalibrierung charakterisiert. Kennzeichnend für die statistischen Modelle sind die Verwendung von empirischen Einflussfunktionen und deren Kalibrierung mit Hilfe der vorhandenen Messungen. Die hybriden Modelle verwenden Einflussfunktionen, die aus einem physikalischen Ansatz in Kombination mit einer Parameter-Kalibrierung hervorgehen. Bei den gemischten Modellen werden gleichzeitig physikalische und empirische Einflussfunktionen benutzt. Empirische Einflussfunktionen können nicht ohne Kalibrierung verwendet werden. Die Beziehung zwischen den verschiedenen Modellen ist in der Tabelle 1 dargestellt.

		Prognosefunktion	
		Empirisch	Physikalisch
Statistische Koeffizientenbestimmung	Nein		<i>Deterministische Modelle</i>
	Ja	<i>Statistische Modelle</i>	<i>Hybride Modelle</i>

Tabelle 1 – Beziehung zwischen den deterministischen, statistischen und hybriden Modellen (gemischte Modelle: gleichzeitige Verwendung eines deterministischen und eines statistischen Modells).

⁵ Im Gegensatz zu der in diesem Dokument verwendeten Terminologie dient der Begriff *hybrides Modell* andernorts als Synonym für das *gemischte Modell*.



3 Modellierung des Verhaltens von Betontalsperren

3.1 Deterministische und hybride Modelle zur Voraussage von Verschiebungen

Die deterministischen und hybriden Modelle werden hier zusammen beschrieben. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Modellen besteht darin, dass bei deterministischen Modellen Anpassungsparameter fehlen, und somit keine statistische Bearbeitung erforderlich ist.

In der Praxis werden nur die Verschiebungen von Betontalsperren mit diesen Modellen analysiert. Für Betontalsperren ist es sinnvoll, einerseits zwischen den instantanen, elastischen Einflüssen des hydrostatischen Druckes und der Betontemperatur und andererseits der verzögerten Auswirkung des vorwiegend irreversiblen Kriechens gemäss der Gleichung 5 zu unterscheiden:

$$M(t, env) = P_{h,i}(h) + P_{\theta,i}(\theta) + P_d(t, h, \theta) + D(t, env) \quad [5]$$

Eine detaillierte Darstellung der hybriden Modelle wurde durch Bonaldi et al. (1977) gemacht.

3.1.1 Instantane, elastische Hydrostatikkomponente

Die instantane, elastische Hydrostatikkomponente $P_{h,i}(h)$ (Verschiebung eines Punktes auf der Höhe h des Bauwerkes) wird mit der folgenden Form beschrieben:

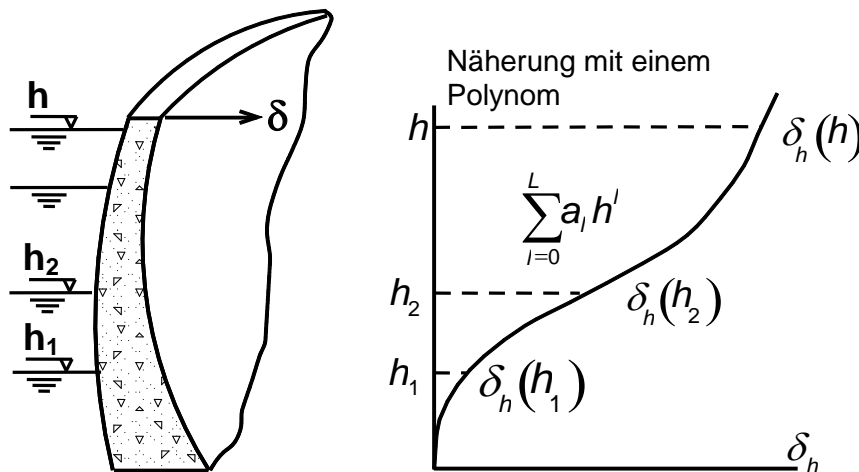
$$P_{h,i}(h) = X\delta_h(h) \quad [7]$$

Dabei ist X ein anpassbarer Parameter (nur hybride Modelle) und $\delta_h(h)$ die Verschiebung, die mit einer deterministischen Berechnung (finite Elemente oder andere Methode) bestimmt wird.

In der Praxis werden die instantanen Verschiebungen $\delta_h(h_1)$, $\delta_h(h_2)$, $\delta_h(h_3)$, ... deterministisch für die Seestände h_1 , h_2 , h_3 , ... berechnet. Die Verschiebung $\delta_h(h)$ für einen beliebig gewählten Seestand h wird durch Interpolation – beispielsweise mit Hilfe eines Polynoms (siehe Figur 3) – bestimmt. Damit lässt sich die Verschiebung $\delta_h(h)$ eines gegebenen Punktes des Bauwerkes für einen beliebigen Wasserstand h durch eine Gleichung des Typs

$$\delta_h(h) = \sum_{l=0}^L a_l h^l \quad [8]$$

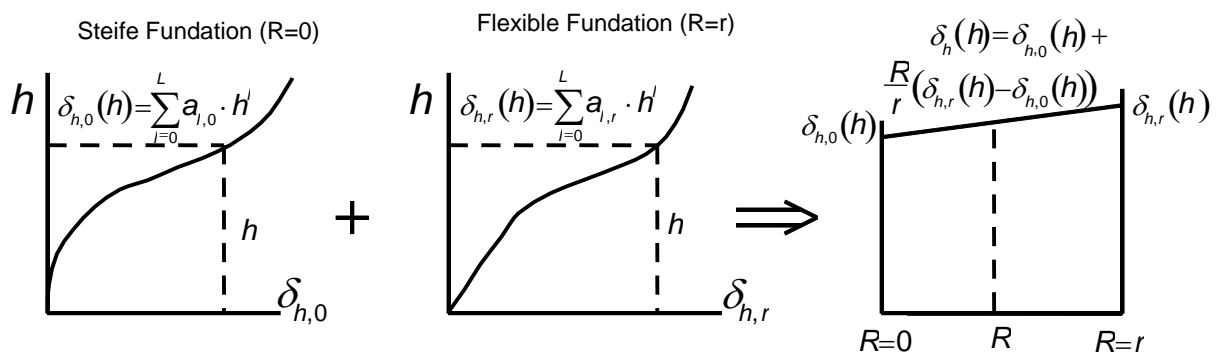
angeben, wobei a_l die Kalibrierungs-Koeffizienten des Polynoms und L dessen Grad sind.



Figur 3 – Berechnung der instantanen, elastischen Hydrostatikkomponente der Verschiebung.

Diese Überlegungen setzen voraus, dass die massgebenden Materialeigenschaften – wie die Elastizitätsmodule des Betons E_c und der Fundation E_r – bekannt sind. In einem hybriden Modell kann das Verhältnis E_c/E_r allerdings auch als zusätzlicher, anpassbarer Parameter R gewählt werden. Die Verschiebung $\delta_h(h)$ wird dann mit Hilfe einer linearen Interpolation zwischen der Verschiebung $\delta_{h,0}(h)$ für eine steife Fundation ($E_r = \infty$, $E_c/E_r = 0$) und der Verschiebung $\delta_{h,r}(h)$ für eine Fundation mit einer beliebig gewählten Steifigkeit r berechnet (für beide Berechnungen wird derselbe Beton-Elastizitätsmodul verwendet). Daraus folgt mit der Figur 4 die Formel

$$\delta_h(h) = \delta_{h,0}(h) + \frac{R}{r} (\delta_{h,r}(h) - \delta_{h,0}(h)) \quad [9]$$



Figur 4 – Interpolation zwischen der Lösung für eine steife Fundation und einer Fundation mit beliebig gewählter Steifigkeit r .

Durch Substitution von $X \cdot R/r$ mit Y folgt aus der Gleichung 7 die Beziehung

$$P_{h,i}(h) = X \delta_{h,0}(h) + Y (\delta_{h,r}(h) - \delta_{h,0}(h)) \quad [10]$$

wo X und Y zwei Koeffizienten sind. Wird der Polynomausdruck der Gleichung 8 eingesetzt, resultiert



$$P_{h,i}(h) = X \sum_{l=0}^L a_{l,0} h^l + Y \sum_{l=0}^L (a_l - a_{l,0}) h^l \quad [11]$$

Die Koeffizienten müssen auf analoge Art und Weise angepasst werden, wie dies bei den statistischen Modellen der Fall ist (siehe weiter unten). Eine deutliche Verbesserung der Voraussage ist damit aber nicht zu erwarten.

In einem deterministischen Modell werden keine Koeffizienten eingeführt, und die Voraussage der Verschiebung $P_h(h)$ ist basierend auf den Gleichungen 7 und 8 durch die Beziehung

$$P_{h,i}(h) = \delta_h(h) = \sum_{l=0}^L a_l h^l \quad [12]$$

gegeben.

3.1.2 Instantane, elastische Temperaturkomponente

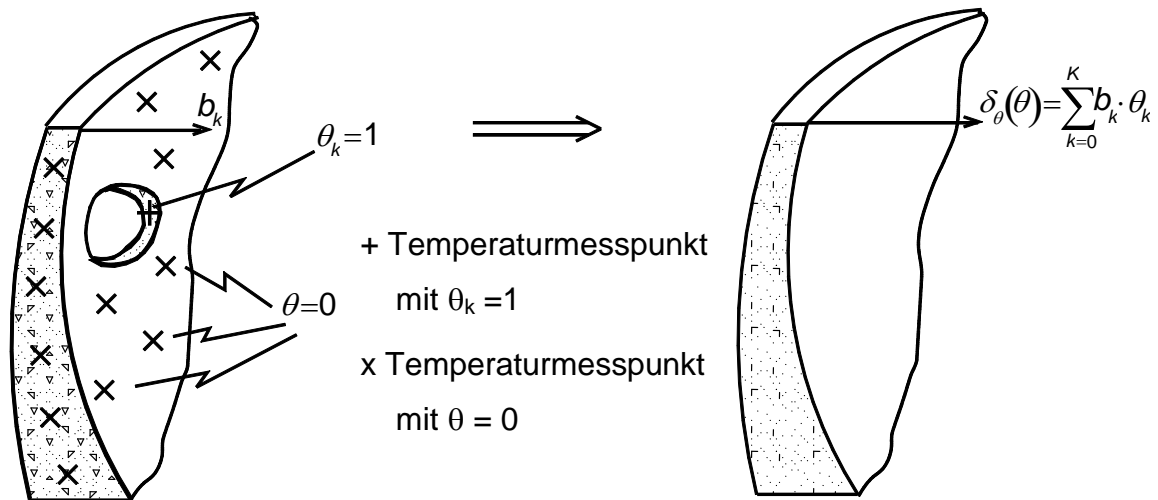
Auf dieselbe Art und Weise wird die instantane, elastische Temperaturkomponente $P_{\theta,i}(\theta)$ (Verschiebung eines Punktes der Talsperre infolge eines bestimmten Temperaturfeldes) entwickelt:

$$P_{\theta,i}(\theta) = Z \delta_{\theta}(\theta) \quad [13]$$

Dabei bezeichnet Z einen anpassbaren Parameter, und $\delta_{\theta}(\theta)$ ist die Verschiebung, welche mit einer deterministischen Berechnung (finite Elemente oder andere Methode) bestimmt wird. Die Verschiebung wird üblicherweise für Einheitsänderungen der Temperatur an verschiedenen Temperaturmesspunkten k im Staumauerkörper berechnet. Die Verschiebung $\delta_{\theta}(\theta)$ in einem bestimmten Punkt der Talsperre ist folglich (siehe Figur 5)

$$\delta_{\theta}(\theta) = \sum_{k=1}^K b_k \theta_k \quad [14]$$

wobei b_k die Temperatureinflusskoeffizienten und θ_k die Temperaturen bezeichnen, die für die Messpunkte k gelten. Die Koeffizienten b_k werden für einen festgelegten Wert des thermischen Materialausdehnungskoeffizienten berechnet. Bei den Temperaturen θ_k muss jeweils der Wert, der zum Zeitpunkt der Nullmessung herrschte, subtrahiert werden.

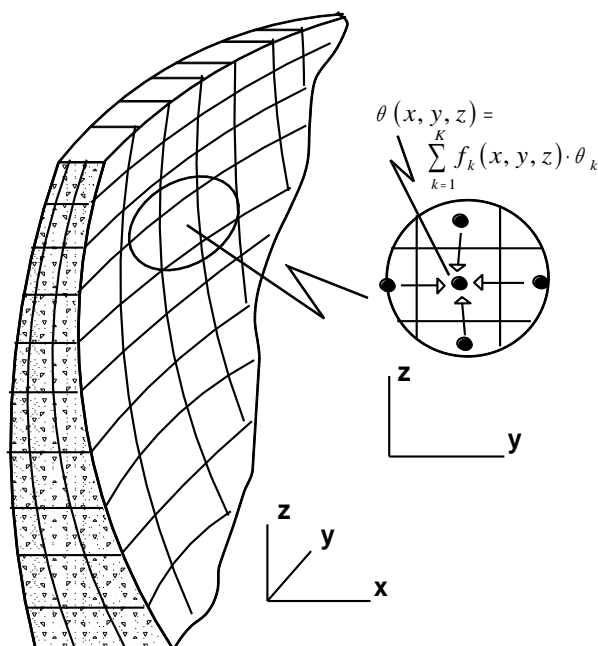


Figur 5 – Berechnung der instantanen elastischen Temperaturkomponente.

In der Praxis sind die Knoten der geometrischen Modellierung wesentlich zahlreicher als die Temperaturmesspunkte; ausserdem stimmt die Lage der ersteren nicht unbedingt mit derjenigen der letzteren überein. Es werden deshalb Formfunktionen $f_k(x, y, z)$ eingeführt, mit welchen die Temperatur in allen Punkten (Koordinaten x, y, z) der Talsperre interpoliert werden kann:

$$\theta(x, y, z) = \sum_{k=1}^K f_k(x, y, z) \theta_k \quad [15]$$

Die Formfunktion f_k nimmt im Thermometerpunkt k mit den Koordinaten x_k, y_k, z_k den Wert 1 an; in allen anderen Thermometerpunkten l mit den Koordinaten x_l, y_l, z_l hat sie den Wert 0 (siehe Figur 6). Auch hier fehlt bei einem deterministischen Modell der anpassbare Parameter Z in der Gleichung 13.



Figur 6 – Interpolation der Temperatur.



3.1.3 Näherung für die instantane, elastische Temperaturkomponente

Es ist offensichtlich, dass die im Abschnitt 3.1.2 beschriebene Methode sehr aufwändig ist. Eine in der Praxis gängige Näherung ist die Analyse einer begrenzten Anzahl von repräsentativen Vertikalschnitten⁶ (im Extremfall nur einer) und die Berücksichtigung der Verschiebungen, welche durch die Durchschnittstemperaturen $\Delta\theta$ und durch die Temperaturgradienten $\Delta\Delta\theta$ in den Horizontalschnitten verursacht werden (sie sind die Hauptanteile der thermisch bedingten Verformungen einer Betonsperre). Es sind folglich die Einflusskoeffizienten der Einheits-Durchschnittstemperaturen und der Einheits-Temperaturgradienten zu bestimmen.

In der Figur 7, die einen Vertikalschnitt zeigt, ist dies schematisch dargestellt. Eine Einheits-Durchschnittstemperatur wird einem beliebigen Horizontalschnitt zugeteilt (Schnitt j) und nimmt zu den angrenzenden Schnitten nach oben und unten hin linear auf Null ab; überall sonst ist die Temperatur Null. Dies wird für alle Horizontalschnitte und analog auch für die Einheits-Temperaturgradienten wiederholt. Jeder dieser Lastfälle wird einzeln analysiert und die entsprechenden Einflusskoeffizienten mit Hilfe eines statischen Modells bestimmt. Die grösste Vereinfachung ergibt sich mit der Annahme, dass im ganzen Schnitt oder sogar in der ganzen Talsperre dieselbe Durchschnittstemperatur und derselbe Temperaturgradient vorhanden sind.

Idealerweise werden die Horizontalschnitte so gewählt, dass sie mit den mit Thermometern ausgerüsteten Horizontalschnitten der Talsperre übereinstimmen (siehe linke Seite der Figur 7). Die Durchschnittstemperatur⁷ und der Temperaturgradient können dann analytisch (Stucky & Derron 1957) oder numerisch berechnet werden, auch wenn die Temperatur nur an den Paramenten gemessen wird (Wasser- und Lufttemperatur).

In allen Fällen geht es aber darum, die Durchschnittstemperaturen $\Delta\theta_j$ und Temperaturgradienten $\Delta\Delta\theta_j$ im Schnitt j mit den bei den Thermometern gemessenen Temperaturen θ_k wie folgt auszudrücken:

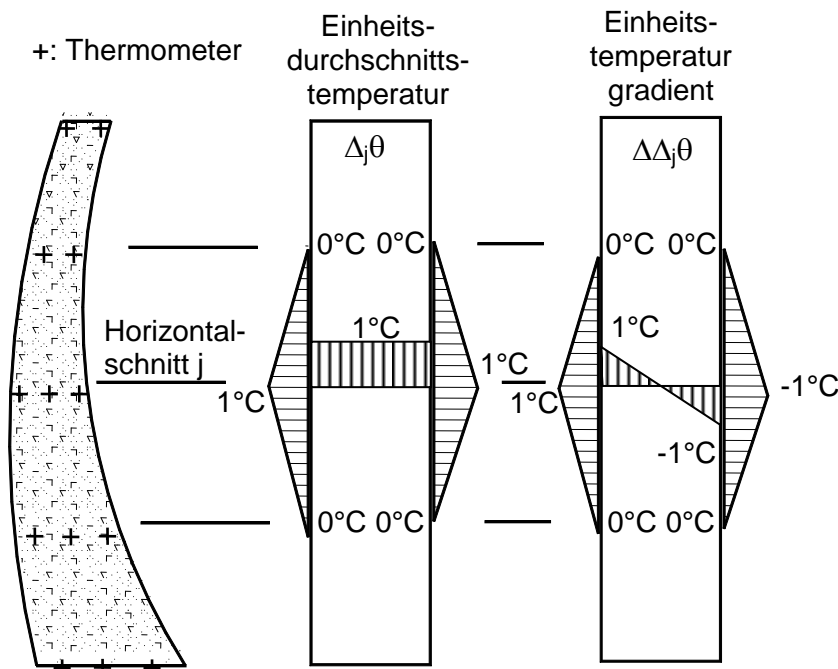
$$\Delta\theta_j = \sum_{k=1}^K r_k \theta_k \quad [16a]$$

$$\Delta\Delta\theta_j = \sum_{k=1}^K s_k \theta_k \quad [16b]$$

r_k und s_k sind die zugehörigen Einflussfaktoren.

⁶ Das Temperaturprofil eines Vertikalschnitts wird dabei einem oder mehreren Mauerblöcken zugeordnet.

⁷ Effektiv ist diejenige Temperaturdifferenz massgebend, die sich ergibt, wenn die Fugenschlusstemperatur (Nullmessung) abgezogen wird.



Figur 7 – Näherung für die instantane elastische Temperaturkomponente.

Links: Vertikalschnitt.

Mitte: Lastfall der Einheitsdurchschnittstemperatur im Horizontalschnitt j.

Rechts: Lastfall des Einheits-temperaturgradienten im Horizontalschnitt j.

3.1.4 Ermittlung der instantanen, elastischen Temperaturkomponente bei Fehlen geeigneter Temperaturmesspunkte.

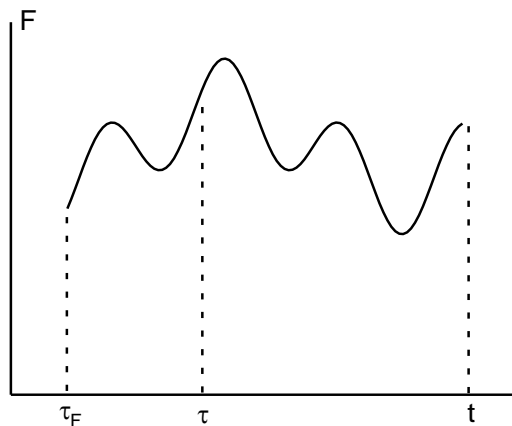
Oft erlauben die Verteilung der Temperaturmesspunkte und/oder die Ungenauigkeit der Messungen oder gar das Fehlen von Temperaturmessungen keine vollständig zufrieden stellende Anwendung des vorangehend beschriebenen Modells. In solchen Fällen bieten sich die Schätzung der Mauertemperatur anhand der Variation von Luft- und Wassertemperatur (oder sogar nur der Lufttemperatur) oder anhand der Jahreszeit als Lösungen an. Diese Näherungen sind bei statistischen Modellen gebräuchlich; sie werden deshalb im nachfolgenden Abschnitt 3.2 beschrieben.

3.1.5 Komponente der verzögerten Einflüsse

Die in einem deterministischen Modell berücksichtigten Ursachen für verzögerte Effekte sind das Kriechen der Talsperre und der Foundation. Die klassische Kriechformel basiert auf der Annahme eines visko-elastischen Materials, für das

$$U_F(t) = \int_{\tau_F}^t \varphi(t, \tau) \frac{dF(\tau)}{d\tau} d\tau \quad [17]$$

gilt. Dabei bezeichnen $U_F(t)$ die Verformung zum Zeitpunkt t , τ_F den Beginn der Einwirkung der äusseren Last, $F(\tau)$ die zum Zeitpunkt τ vorhandene äussere Last und $\varphi(t, \tau)$ die Kriechfunktion (siehe Figur 8).

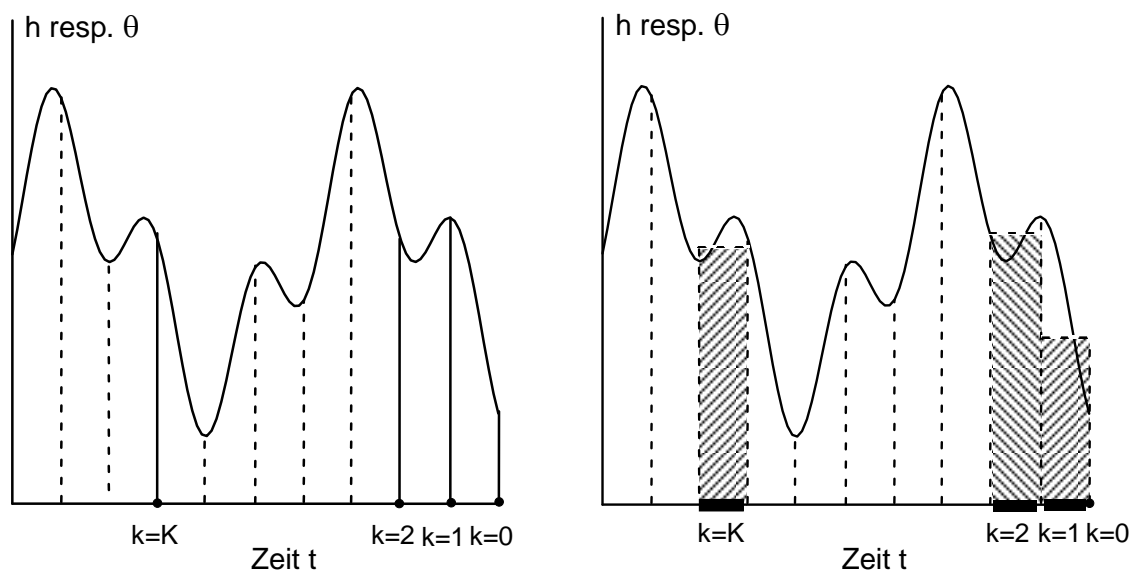


Figur 8 – Zeitgrößen t , τ und τ_F sowie Last F .

Die exakte Form der Kriechfunktion wird mit Hilfe von Laboruntersuchungen und aufgrund der Betonzusammensetzung festgelegt. Die Grösse F steht symbolisch für die gesamte Last; sie muss durch Verwendung einer geeigneten Gleichung (z.B. Polynom) mit dem Wasserstand und der Temperatur in Beziehung gebracht werden.

Es zeigt sich, dass die Anwendung eines solchen Ansatzes unpraktikabel wird, falls keine Vereinfachungen eingeführt werden. In der Praxis wird normalerweise eine der folgenden zwei Näherungen verwendet (falls die verzögerten Effekte nicht sogar ganz vernachlässigt werden):

- Ersetzen der Integrale durch endliche Summen von instantanen Wasserstands- und Temperaturwerten für mehrere, vorangehende Zeitpunkte (Figur 9 links), oder von gemittelten Wasserstands- und Temperaturwerten für mehrere vorangehende Zeitintervalle (Figur 9 rechts);
- Simulation der verzögerten Einflüsse mit Gleichungen ohne Abhängigkeit von Wasserstand und Temperatur. (Dabei wird implizit angenommen, dass die verzögerten Einflüsse nur von den Langzeit-Mittelwerten der Lasten abhängen und deshalb als konstant angenommen werden können).



Figur 9 – Diskretisierung der verzögerten Einflüsse.

Links: durch Summieren von Instantanwerten. Rechts: durch Summieren von Mittelwerten.



Bei Anwendung der vorangehend beschriebenen Näherung „a“ und mit Beschränkung auf den Einfluss von Wasserstand und Talsperren-Mitteltemperatur können die verzögerten Effekte wie folgt berechnet werden:

$$U_F(t) = \sum_{k=0}^K (\alpha_k h_k + \beta_k \theta_k) \quad [18]$$

Dabei bezeichnen α_k und β_k die Polynomkoeffizienten, h_k den Wasserstand und θ_k die Temperatur zu einem in der Vergangenheit liegenden Zeitpunkt k (Figur 9 links). Als Alternative können die Werte h_k und θ_k der Gleichung 18 auch als Wasserstands- und Temperatur-Mittelwerte des k -ten, dem aktuellen Zeitpunkt vorangehenden Zeitintervalls angenommen werden (Figur 9 rechts). K steht für die Gesamtanzahl der berücksichtigten Zeitpunkte respektive Zeitintervalle.

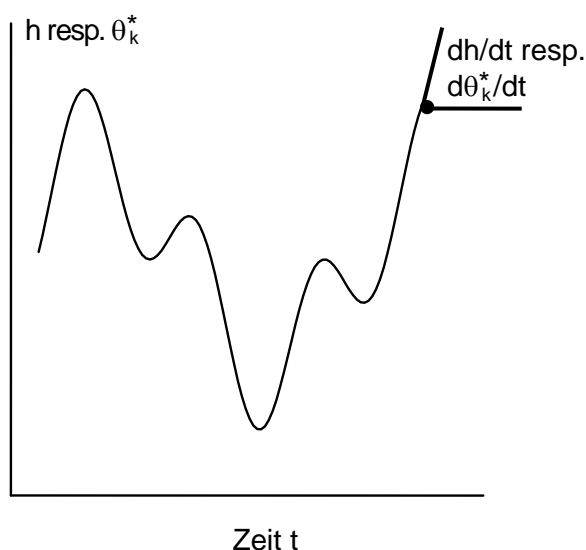
Eine in der Praxis angewandte Näherung besteht darin, in Gleichung 18 die Summe durch Zeitgradienten zu ersetzen (siehe Figur 10). Für die verzögerten Temperatureinflüsse verwenden Bonaldi et al. (1977) nach Einführung von Formfunktionen entsprechend der Gleichung 15 den folgenden Ansatz:

$$\sum_{k=1}^K b_k \frac{d\theta_k^*}{dt} \quad [19]$$

Dabei bezeichnet b_k den Einflusskoeffizienten, der dem „geeignet geglätteten“ (Symbol *) Temperaturgradienten am Messpunkt k zugeordnet wird. Für den verzögerten hydrostatischen Einfluss hat Bossoney (1985) den Ansatz

$$a \frac{dh}{dt} \quad [20]$$

formuliert. Hier bezeichnet a den zum Wasserstandsgradienten gehörenden Einflusskoeffizienten.



Figur 10 – Verwendung von Zeitgradienten.



3.2 Statistische Modelle zur Voraussage von Verschiebungen

Die statistische Methode besteht in der Approximation der Form der deterministischen Indikatoren durch „einfache“ Funktionen, die leichter handzuhaben sind. Ein statistisches Modell ist folglich nur im denjenigen Fällen anwendbar, wo diese einfachen Funktionen das wahre Verhalten auch widerspiegeln können.

Das allgemeine Modell, das üblicherweise zur Voraussage der Verschiebungen eines Punktes einer Betonsperre verwendet wird, ist

$$P(t, h, s) = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4 + a_5 e^{-t} + a_6 e^t + a_7 \cos s + a_8 \sin s + a_9 \sin^2 s + a_{10} \sin s \cos s \quad [21a]$$

oder alternativ durch Ersetzen des exponentiellen Terms $a_6 e^t$ mit einem linearen Ausdruck $a_6 t$

$$P(t, h, s) = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4 + a_5 e^{-t} + a_6 t + a_7 \cos s + a_8 \sin s + a_9 \sin^2 s + a_{10} \sin s \cos s \quad [21b]$$

Dabei bezeichnet t die Zeit; sie wird im Allgemeinen in Jahren ausgedrückt. Der Zeitnullpunkt sollte nicht allzu weit zurückliegen, um numerische Probleme zu vermeiden, die durch den Term e^t verursacht werden können. Die Grösse s steht für die Jahreszeit. Sie variiert zwischen 0 am 1. Januar und 2π am 31. Dezember entsprechend der Formel

$$s = \frac{j}{365.25} 2\pi \quad [22]$$

wobei j die Anzahl Tage seit dem 1. Januar ist.

Die Gleichung 21 ist nicht die einzige mögliche Formulierung. Sie wurde aber nicht willkürlich angesetzt, sondern berücksichtigt die Physik der Problemstellung.

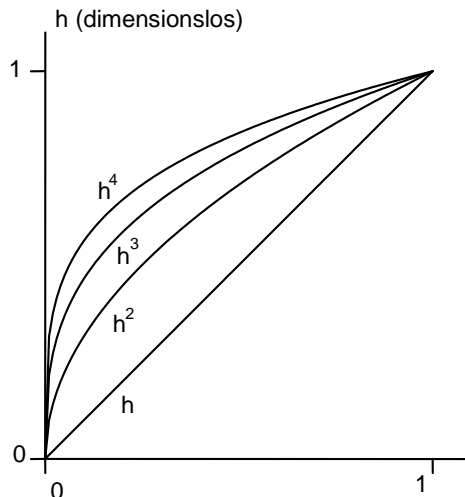
Die statistischen Modelle werden hier mit Trennung der reversiblen von den irreversiblen Effekten gemäss Gleichung 2 behandelt:

$$M(t, env) = P_{h,r}(t, h) + P_{\theta,r}(t, \theta) + P_s(t, h, \theta) + D(t, env) \quad [2]$$

3.2.1 Reversible hydrostatische Komponente

In der Regel wird zur Voraussage der Verschiebungen eines Punktes einer Betontalsperre in Funktion des Wasserstandes h ein Polynom vierten Grades verwendet (Gleichung 8 mit $L=4$, und Figur 11):

$$P_{h,r}(h) = a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4 \quad [23]$$



Figur 11 – Funktionen zur Voraussage des hydrostatischen Einflusses.

Breitenstein et al. (1985) berücksichtigen die verzögerten Auswirkungen näherungsweise durch Einfügen eines zusätzlichen Terms, der eine Funktion der Wasserstandsänderung gegenüber einer vorangehenden Periode ist:

$$a_{11}(h - h_k) \quad [24]$$

Die Grösse h_k ist der Wasserstand k Tage vor der Messung ($k=7$ in Breitenstein et al. (1985)).

Widman (1967) verwendet zur Berücksichtigung der verzögerten Auswirkungen die Differenz zwischen dem Wasserstand h zum Zeitpunkt der Messung und dem Mittelwert \bar{h}_l der l vorangehenden Tage ($l=20$ in Widman (1967)):

$$a_{11}(h - \bar{h}_l) \quad [25]$$

3.2.2 Reversible Temperaturkomponente

Um den Beitrag der Temperatur zu den reversiblen Verschiebungen zu beschreiben, wird häufig eine drastische Vereinfachung verwendet. Dabei werden die Luft- und Wassertemperatur sowie die Temperatur, die in verschiedenen Punkten der Talsperre herrscht, zu Gunsten einer saisonalen Kurve vernachlässigt. Gemäss Willm & Beaujoint (1967) wird die saisonale Kurve durch

$$P_{\theta,r}(s) = a_7 \cos s + a_8 \sin s + a_9 \sin^2 s + a_{10} \sin s \cos s \quad [26a]$$

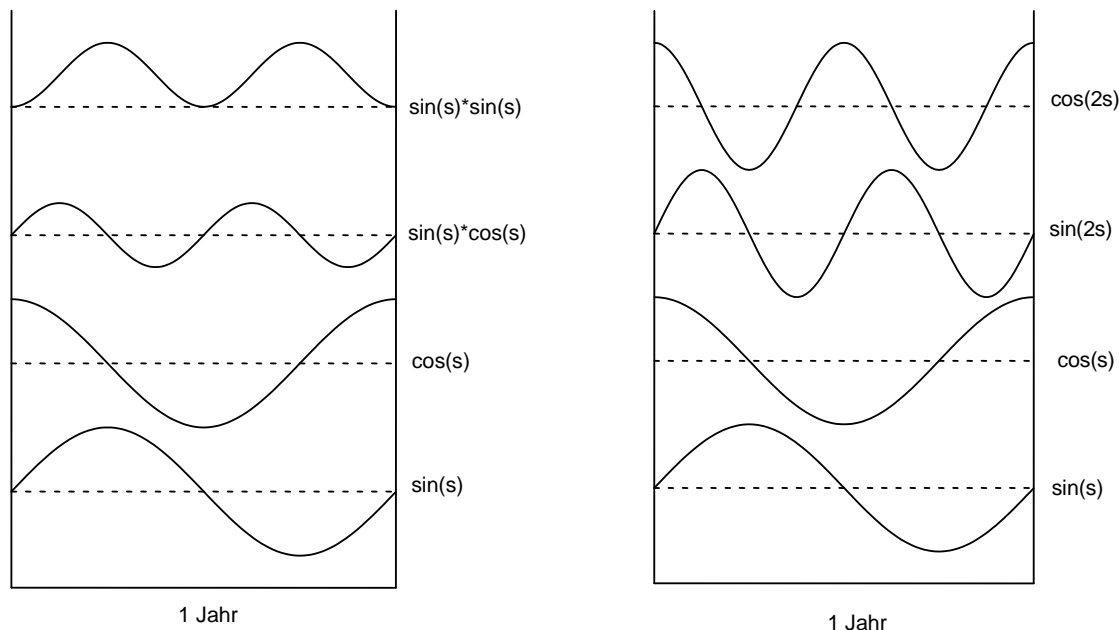
gegeben. Die Eigenschaften der trigonometrischen Funktionen ermöglichen es, die Gleichung 26a neu zu schreiben:

$$P_{\theta,r}(s) = a_7 \cos s + a_8 \sin s + a_9 \cos 2s + a_{10} \sin 2s \quad [26b]$$

wobei sich die Koeffizienten a_7 bis a_{10} von den gleich bezeichneten Koeffizienten der Gleichung 26a unterscheiden. Damit wird klar ersichtlich, dass die saisonale Kurve aus zwei harmonischen Termen mit einer Periode von einem Jahr und zwei harmonischen Termen mit einer Halbjahresperiode bestehen. Die Saison s variiert vom 1. Januar bis zum 31. Dezember zwischen 0 und 2π (siehe Gleichung 22).



Die durch die Gleichungen 26a und 26b gegebenen Ansätze entsprechen den Gliedern erster und zweiter Ordnung einer Fourier-Reihe⁸. Sie sind in der Figur 12 jeweils separat dargestellt.



Figur 12 – Trigonometrische Funktionen zur Voraussage der Saisoneinflüsse (Temperatur)
Links: gemäss Gleichung 26a
Rechts: gemäss Gleichung 26b

Diese Vorgehensweise vernachlässigt die zwischen verschiedenen Jahren auftretenden Temperaturunterschiede. Dadurch kann es vor allem bei schlanken Talsperren zu erheblichen Voraussagefehlern kommen. Andererseits ist dies aber oft die einzig mögliche Vorgehensweise, z.B. bei Fehlen von Thermometern oder bei schlecht platzierten Thermometern.

Als Ergänzung zur Grösse $P_{\theta,r}(s)$ gemäss Gleichung 26a oder 26b, die nur den Einfluss der langjährigen Mitteltemperatur darstellt, haben Breitenstein et al. (1985) einen zusätzlichen Term eingeführt, der den Einfluss der Differenz zwischen der effektiven Temperatur und dem langjährigen Mittel ausdrückt. Dieser zusätzliche Term hat die Form

$$a_{12}(\theta - \bar{\theta}_j) + a_{13}(\theta - \bar{\theta}_k) + a_{14}(\theta - \bar{\theta}_l) \quad [27]$$

Die Temperatur $\bar{\theta}_j$ ist die mittlere Lufttemperatur über eine Periode von j Tagen vor dem Datum der Messung (entsprechend für $\bar{\theta}_k$ und $\bar{\theta}_l$). Die zu berücksichtigenden Perioden sind von der Mauerdicke der Talsperre abhängig. Bei schlanken Bauwerken haben Temperaturschwankungen eine rasche Auswirkung, dicke Mauern reagieren erst mit einer grösseren Verzögerung. Widman (1967) verwendet die Periodenwerte $j=5, k=20, l=50$ Tage.

Aus den vorangehenden Betrachtungen lässt sich schliessen, dass die Behandlung der reversiblen Temperatureffekte komplex ist und in der Praxis oft nur näherungsweise erfolgen kann. Zwei Punkte sind in Bezug auf die hier gemachten Überlegungen hervorzuheben:

⁸ Im Ansatz können auch Glieder höheren Grades berücksichtigt werden.



- a. Die Gleichungen 26a und 26b verwenden keine Temperaturmessung.
- b. Die Gleichung 26a und 26b setzen voraus, dass der thermische Zustand der Talsperre vorwiegend zyklisch variiert.

3.2.3 Irreversible Komponente

Zur Beschreibung der irreversiblen Komponente wird normalerweise eine Kombination von Exponentialfunktionen verwendet

$$P_s(t) = a_5 e^{-t} + a_6 e^t \quad [28a]$$

oder die Kombination einer exponentiell abnehmenden mit einer linearen Funktion

$$P_s(t) = a_5 e^{-t} + a_6 t \quad [28b]$$

Dabei steht die Grösse t für ein dimensionsloses Mass der Zeit, z.B. das Verhältnis zwischen der betrachteten Zeitspanne und einer Referenzdauer. Die Referenzdauer sollte als unabhängiger, mit Hilfe einer Regressionsanalyse zu bestimmender Parameter gewählt werden. Diese Analyse wird nicht linear und erfordert zur Lösung zumeist einen iterativen Ansatz. Auf konkrete Voraussagen scheint die Referenzdauer jedoch nur einen geringen Einfluss zu haben; sie wird in der Praxis deshalb willkürlich gewählt (üblicherweise zu 1 Jahr).

Als Alternative zu den Gleichung 28a und 28b benutzen Breitenstein et al. (1985)

$$P_s(t) = a_5 t + a_6 \left(\ln \left[1 + \frac{t}{c_1} \right] \right)^{\frac{1}{c_2}} + a_{15} \left(1 - e^{-\frac{t}{c_3}} \right) \quad [29]$$

wo c_1 , c_2 und c_3 drei zu bestimmende Konstanten sind.

Willm & Beaujoint (1967) wie auch Lugiez et al. (1970) verwenden die Beziehung

$$P_s(t) = a_5 \log t + a_6 e^t \quad [30]$$

Widman (1967) benutzt die Formel

$$P_s(t) = a_5 t + a_6 \ln t \quad [31]$$

Silva Gomes & Silva Matos (1985) verwenden einen Polynomansatz

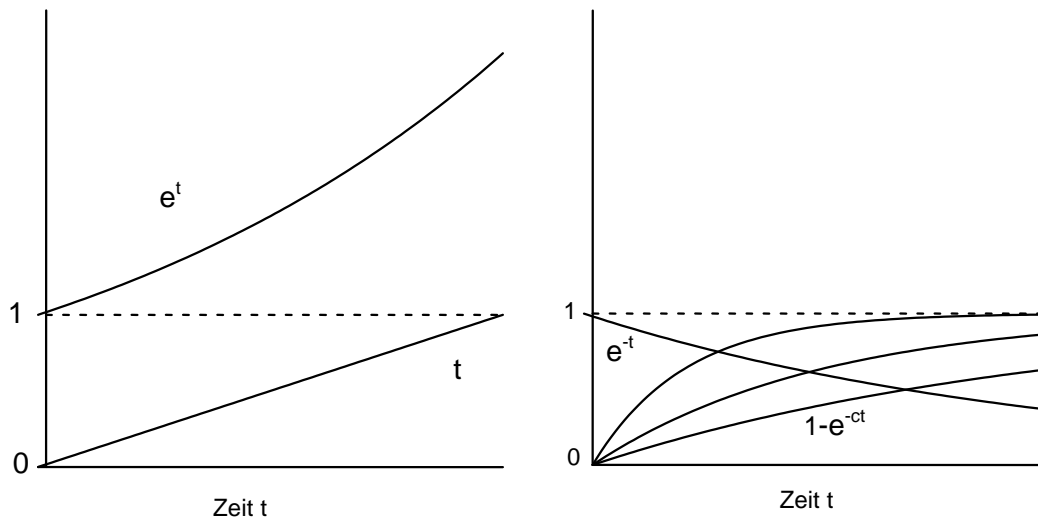
$$P_s(t) = a_5 t + a_6 t^2 + a_{15} t^3 \quad [32]$$

Die zuvor beschriebenen, gemäss der Literatur in der Praxis häufig verwendeten Formeln, enthalten streng monotone Funktionen (steigend oder fallend, mit oder ohne horizontale Asymptote). Einige Experten empfehlen, nur Funktionen mit horizontaler Asymptote zu verwenden, wie z.B.

$$P_s(t) = a_5 e^{-ct} \quad [33]$$



wobei c eine willkürliche Konstante ist.



Figur 13 – Funktionen zur Voraussage der irreversiblen Komponente.
Links: Funktionen ohne horizontale Asymptote.
Rechts: Funktionen mit horizontaler Asymptote.

Welche Form auch immer zur Voraussage der irreversiblen Komponente verwendet wird, es muss daran gedacht werden, dass sie ein irreversibles Verhalten der Talsperre abbildet! Falls eine solche Komponente nicht die Tendenz hat, sich mit der Zeit zu stabilisieren oder dies nur äusserst langsam tut, könnte dies auf ein inakzeptables Verhalten der Talsperre hindeuten.

3.2.4 Bemerkung zum Weglassen der irreversiblen Komponente

Man kann versucht sein, die irreversible Komponente der Voraussage $P_s(t)$ wegzulassen und eine vereinfachte Form der Gleichung 2 anzuwenden

$$M(t, env) = P_{h,r}(t, h) + P_{\theta,r}(t, \theta) + D(t, env) \quad [34]$$

Der Unterschied $D(t, env)$ zwischen der Messung und der Voraussage enthält dann eine allfällige irreversible Komponente. Ist diese Komponente bedeutend, so hat sie die Tendenz, Messfehler, Fehler der Modellierung und der numerischen Berechnung sowie sonstige Abweichungen zu verdecken. Dies muss vermieden werden. Es ist deshalb besser, die irreversible Komponente explizit ins Modell einzubeziehen. Gleichzeitig muss natürlich die Bedeutung und die Entwicklung dieser Komponente für die untersuchte Talsperre genau analysiert werden.

3.2.5 Konstanter Term

Konstanten widerspiegeln die willkürliche Wahl des Nullpunktes für die massgebenden Variablen und die Verhaltensindikatoren. Diese eigenständigen Terme werden mit der Konstanten a_0 in der Voraussagefunktion zusammengefasst.



3.2.6 Verwendung von vorangehenden Messungen des Verhaltensindikators

Eine Alternative zur Gleichung 21 besteht in der Berücksichtigung von vorangehenden Messwerten des Verhaltensindikators

$$P(t, h, s) = a_j M_j + a_k M_k + a_l M_l + \dots + a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4 + a_5 e^{-t} + a_6 e^t + a_7 \cos s + a_8 \sin s + a_9 \sin^2 s + a_{10} \sin s \cos s \quad [35a]$$

oder

$$P(t, h, s) = a_j M_j + a_k M_k + a_l M_l + \dots + a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4 + a_5 e^{-t} + a_6 t + a_7 \cos s + a_8 \sin s + a_9 \sin^2 s + a_{10} \sin s \cos s \quad [35b]$$

M_j, M_k, M_l, \dots sind Messwerte des Verhaltensindikators, die j Tage, k Tage, l Tage, ... vor dem Stichtag gemessen wurden. Damit enthält die Gleichung so genannte *autoregressive* Terme. Auch wenn diese Modellierung fast immer eine bessere Voraussage ergibt als diejenige der Gleichung 21, ist sie nicht in der Lage, ein langsames Abdriften des Verhaltensindikators aufzuzeigen. Zwar würde eine solches Abdriften in den Termen $a_j M_j, a_k M_k, a_l M_l, \dots$ zusammen mit anderen Effekten erscheinen, aber nicht in der Differenz zwischen vorausgesagtem und gemessenem Werten. Ein solches Modell würde also das Auftreten eines abnormalen Verhaltens verdecken, anstatt es sichtbar zu machen. Im Rahmen der Talsperrenüberwachung muss deshalb unbedingt darauf verzichtet werden, auf autoregressive Modelle zurückzugreifen. Sie können aber für Plausibilitätskontrollen bei den durch den Talsperrenwärter durchgeführten Messungen verwendet werden (siehe Abschnitt 1.1).

3.2.7 Bemerkungen

Ein hybrides Modell ist nichts anderes als ein deterministisches Modell, das mit dem Ziel der besseren Annäherung an die Wirklichkeit kalibriert wurde. Ein statistisches Modell kann als ein hybrides Modell angesehen werden, bei welchem die Verhaltensfunktionen angenähert wurden. Dies unterstreicht die Tatsache, dass die Einflussfunktionen nicht willkürlich sind, sondern eine physikalische Grundlage haben müssen.

Willm & Beaujoint (1967) können als Urheber der *statistischen Methode der Überwachung*, angesehen werden. Später wurde diese Methode auch von Widman (1967), Lugiez et al. (1970), Bossoney (1985) und Singh & Li (1992)⁹ beschrieben. Die meist verbreitete Formel ist die Gleichung 21 (oder eine Spezialform davon).

Bei der Erarbeitung eines statistischen Modells stellt die Temperaturkomponente häufig ein Problem dar, da es oft schwierig ist, sie von der hydrostatischen Komponente zu trennen. Erwähnt sei einerseits die Verknüpfung des Jahreszeitenzykluses mit dem Bewirtschaftungszyklus und andererseits der Einfluss des Seestands auf die Temperatur der Talsperre. Ein Aufstauen im Sommer kühlt die Talsperre ab, während ein Aufstauen im Winter sie vor einer grösseren Abkühlung bewahrt.

⁹ Dieser Artikel enthält auch eine detaillierte Beschreibung der Modellierungsmethoden für Verformungen von Betontalsperren und eine Literaturübersicht, gemäss der eine erste Anwendung der statistischen Methode bereits im Jahr 1955 stattfand.



3.3 Funktionen für die statistische Modellierung anderer Situationen

Die statistische Modellierung kann auch für andere Zwecke verwendet werden als zur Voraussage von Verschiebungen bei Betonsperren. In der Praxis wird von dieser Möglichkeit noch wenig Gebrauch gemacht.

Die Einflussfunktionen und die gewählten massgebenden Variablen müssen dabei eine physikalische Wirklichkeit des studierten Phänomens und des zu untersuchenden Systems abbilden.

3.3.1 Bewegung bei Dämmen

Es wird allgemein angenommen, dass nur die Variablen

- a. Zeit (Alter) und
- b. Wasserstand

für die Voraussage der Bewegung eines Punktes bei einem Damm zu berücksichtigen sind. In der Schweiz limitiert gegenwärtig aber das Fehlen ausreichend häufiger Messungen Voraussagen dieser Art.

3.3.2 Porenwasserdrücke

Loudière et al. (1985) haben festgestellt, dass der Einfluss des Wasserstands auf das Niveau zweier Piezometer beim Damm Le Drennec die folgende Form hat:

$$z = z_0 + \alpha(h - h_0)H[h - h_0] \quad [36]$$

wobei h_0 ein Referenzwasserstand ist und $H[h - h_0]$ eine Einheitssprungfunktion bezeichnet, die für $h > h_0$ den Wert 1 annimmt und für $h < h_0$ den Wert 0 besitzt. Die Grösse α ist ein anpassbarer Koeffizient.

Guedes & Coelho (1985) erhalten den Porenwasserdruck der Talsperre Funil mit der Formel

$$p = a_0 + a_1 h_{15} + a_2 t^2 + a_3 \ln(1 + t) \quad [37]$$

wobei h für den um ein Referenzniveau reduzierten Wasserstand steht und t die in Tagen ausgedrückte Zeit ist. Der Index 15 bedeutet, dass es sich um den Wasserstand 15 Tage vor dem Datum der Voraussage handelt.

Im Allgemeinen wird angenommen, dass der Porenwasserdruck (auch im Fels) und der Auftrieb von den Verformungen abhängig sind. Theoretisch werden sie deshalb von den gleichen Variablen (Wasserstand, Betontemperatur und Zeit) beeinflusst wie die Verformungen.

3.3.3 Gleiten

Auf ähnliche Art und Weise drücken O'Rourke et al. (1985) die Bewegung einer Gleitfläche am Standort der Talsperre Tablachaca durch



$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \quad [38]$$

aus. Dabei ist y die Zunahme der Gleitflächenbewegung während eines Monats ist. Die massgebenden Variablen sind hier

- x_1 Bewegung der Gleitfläche während des vorangehenden Monats
- x_2 Niederschläge des vorangehenden Monats
- x_3 Höhe der Station
- x_4 in Jahren gemessene Zeit
- x_5 maximaler Wasserstand, der während des Monats erreicht wurde (von diesem muss Referenzwasserstand abgezogen werden)

Für die verschiedenen überwachten Zonen ergeben sich unterschiedliche Konstanten a_0 bis a_5 . Sie werden durch eine Regressionsanalyse bestimmt.

3.3.4 Fugenbewegungen

Guedes & Coelho (1985) sagen die Bewegungen einer Fuge der Talsperre Sobradinho mit folgender Gleichung voraus:

$$\delta = a_1\theta_{23} + a_2\theta_{36} + a_3t + a_4t^2 + a_5 \ln(1+t) \quad [39]$$

wobei θ die Betontemperatur ist. Die Indizes geben an, wie viele Tage vor dem Rechendatum die Temperaturmessungen durchgeführt wurden. Die Grösse t drückt die Zeit in Tagen aus.

Auch die Fugenbewegungen hängen im Allgemeinen von den Verformungen der Talsperre ab. Sie werden folglich von denselben Variablen (Wasserstand, Betontemperatur und Zeit) beeinflusst.

3.3.5 Sickerwasser

Die Sickerwassermenge beim Hochwasserüberfall der Talsperre Itaipu wird von Guedes & Coelho (1985) mit folgender Gleichung vorausgesagt:

$$Q = a_0 + a_1h_{6,11}^2 + a_2t + a_3t^2 + a_4 \ln(1+t) \quad [40]$$

wobei $h_{6,11}$ der Mittelwert des Wasserstands ist, welcher der Messung um 6 bis 11 Tage vorangeht.

Breitenstein et al. (1985) schlagen ihrerseits folgende Gleichung vor:

$$Q = a_0 + a_1h + a_2h^{a_3} \quad [41]$$

Falls die Sickerwassermenge von den Niederschlägen beeinflusst wird, sollten letztere als Variable einbezogen werden.



3.3.6 Verschiebungen

Die vorangehenden Abschnitte haben ausführlich die Voraussage von Verschiebungen mit Hilfe eines jahreszeitlichen Ansatzes behandelt. Bei den Talsperren São Simão und Agua Vermelha verwenden Guedes & Coelho (1985) stattdessen Mittelwerte der Lufttemperatur für die Verschiebungsprognose:

$$\delta = a_0 + a_1 h^3 + a_2 \theta_{pq} \quad [42a]$$

$$\delta = a_0 + a_1 h^4 + a_2 \theta_{pq} \quad [42b]$$

wobei θ_{pq} der Mittelwert der Lufttemperatur ist, der p bis q Tage der Messung vorangeht.

Eine weitere Methode besteht in der Erarbeitung von zwei Voraussagen, eine für das Sommerhalbjahr und eine für das Winterhalbjahr.

3.3.7 Fundationsbewegungen

Die Bewegungen von Punkten in der Foundation der Talsperre werden auf ähnlich Weise behandelt wie die Bewegungen von Punkten im Talsperrenkörper. Dies wurde beispielsweise bei den Talsperren Emosson und Gebidem gemacht. In der Regel werden dieselben Einflussfunktionen und massgebenden Variablen wie für die Voraussage der Bewegungen des Talsperrenkörpers gewählt.

3.3.8 Schlussfolgerung

Die statistische Modellierung kann für beliebige Situationen verwendet werden. Die Einflussfunktionen werden von Fall zu Fall gewählt; nicht auf willkürliche Art und Weise, sondern aufgrund von mechanischen Referenzanalysen oder anderen physikalischen Betrachtungen.

3.4 Verwendung von gemischten Modellen

Die gemischten Modelle wurden im Abschnitt 2.4 erwähnt. Ihre meistverbreitete Form besteht in der Kombination der deterministischen Voraussage des Einflusses des Wasserstandes und der statistischen Bearbeitung der Temperatureinflüsse (und der irreversiblen Effekte, falls sie überhaupt berücksichtigt werden). Die folgenden Erläuterungen beschreiben die einzelnen Schritte bei der Erarbeitung eines gemischten Modells (ausschliesslich Einfluss von Wasserstand und Temperatur).

Ausgangspunkt ist die Gleichung 2, respektive die nachfolgende Gleichung 34 bei Vernachlässigung einer irreversiblen Komponente:

$$M(t, env) = P_{h,r}(t, h) + P_{\theta,r}(t, \theta) + D(t, env) \quad [34]$$

3.4.1 Einfluss des Wasserstandes $P_{h,r}$

Es geht darum, den Einfluss des Wasserstandes $P_{h,r}(t, h) = \delta_h(h)$ mit Hilfe eines deterministischen Modells entsprechend den Ausführungen im Abschnitt 3.1 (insbesondere Gleichung 8) zu beschreiben. Häufig wird für die numerischen Berechnungen ein Finite-Element-Modell benutzt.



3.4.2 Einfluss der Temperatur $P_{\theta,r}$

Zur Vereinfachung wird üblicherweise die Gleichung 26 für die Voraussage des Temperatureinflusses verwendet.

3.4.3 Lösung

Die Gleichung 34 kombiniert mit der Gleichung 26b ergibt

$$M(t, env) = \delta_h(h) + a_7 \cos s + a_8 \sin s + a_9 \cos 2s + a_{10} \sin 2s + D(t, env) \quad [43]$$

Während $\delta_h(h)$ eine deterministische Voraussage des Verhaltens (Verformung eines Punktes der Talsperre) unter einer hydrostatischen Last darstellt, sind die Koeffizienten a_7 bis a_{10} noch nicht bestimmt. Sie müssen entsprechend dem Kapitel 4 (d.h. Minimierung von $D(t, env)$, in der Regel mit der Methode der kleinsten Quadrate) ermittelt werden.



4 Einführung der statistischen Methode

4.1 Vorgehen

Ein statistisches, hybrides oder gemischtes Modell wird immer nach den gleichen Prinzipien aufgebaut. Nach der Wahl des Modells für die Voraussage des Verhaltens einer Talsperre geht es darum,

- a. die Werte der anpassbaren Parameter abzuschätzen;¹⁰
- b. die Gültigkeit des gewählten Modells (d.h. die gewählten Einflussfunktionen) zu prüfen, und diese sinnvoll anzupassen;
- c. zu prüfen, ob eine bestimmte Messung dem Voraussage-Modell wahrscheinlich folgt oder nicht folgt;
- d. in regelmässigen Abständen zu kontrollieren, ob das verwendete Modell immer noch gültig ist.

Diese Aspekte sind „das tägliche Brot“ der Statistik. Sie werden hier für die drei statistischen Elemente entwickelt, auf die sie sich beziehen:

- a. Schätzung der unabhängigen Parameter des Voraussage-Modells;
- b. Plausibilität (im statistischen Sinne) des gewählten Modells, bei seiner Einführung wie auch periodisch bei seiner Anwendung;
- c. Intervall der akzeptierbaren Abweichungen (im statistischen Sinne) zwischen den Beobachtungen (Messungen) und der Voraussage.

Die folgenden Erläuterungen bleiben generell. Der Leser wird aufgefordert, für ein vertieftes Studium ein spezialisiertes Werk, z.B. Montgomery et al. (2001), zu konsultieren.

4.2 Schätzung der Parameter: Mehrfache Regression mit der Methode der kleinsten Quadrate

Ein Modell des Deformationsverhaltens, wie es beispielsweise durch die Gleichung 21 beschrieben wird, kann mit der folgenden Formel ausgedrückt werden:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_j X_j + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \quad [44]$$

Dabei ist p die Anzahl der *unabhängigen Variablen*¹¹, die auch als *Prognosevariablen* oder *Regressoren* bezeichnet werden; $p + 1$ ist die Anzahl der unabhängigen Parameter. X_j ($j=1 \dots p$) ist die j -te unabhängige Variable, β_j ($j=0 \dots p$) ist der j -te unbekannte Parameter und ε ist der Fehler (es wird angenommen, dass er durch eine Zufallsvariable mit dem Erwartungswert Null ausgedrückt werden kann). Dies erlaubt es beispielsweise, die Gleichung 21a mit $p=10$, $\beta_0=a_0$,

¹⁰ Die Parameter werden eher abgeschätzt als bestimmt, da sie von Beobachtungen abhängen und keine genau bekannten Werte sind.

¹¹ Man beachte, dass in der Statistik nur noch von Variablen gesprochen wird, auch wenn einige davon analytisch gesehen eigentlich *Funktionen* der Variablen sind.



$\beta_1=a_1, \dots, \beta_{10}=a_{10}, X_1=h, X_2=h^2, X_3=h^3, X_4=h^4, X_5=e^{-t}, X_6=e^t, X_7=\cos(s), X_8=\sin(s), X_9=\sin^2(s),$ und $X_{10}=\sin(s)\cos(s)$ ausdrücken.

Zur Schätzung der unbekannt Parameter β_j stehen n Beobachtungen (oder Messungen) zur Verfügung. Es gilt $n > p$. Jede Beobachtung j umfasst einerseits den gemessenen Wert y_j des Verhaltensindicators und andererseits die dazugehörigen Werte $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{pi}$ der Einflussfunktionen. Das Modell (Gleichung 44) wird folglich zu

$$\begin{aligned} y_1 &= \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{21} + \dots + \beta_p x_{p1} + \varepsilon_1 \\ y_2 &= \beta_0 + \beta_1 x_{12} + \beta_2 x_{22} + \dots + \beta_p x_{p2} + \varepsilon_2 \\ &\dots \\ y_n &= \beta_0 + \beta_1 x_{1n} + \beta_2 x_{2n} + \dots + \beta_p x_{pn} + \varepsilon_n \end{aligned} \quad [45]$$

wo ε_i der Fehler der i -ten Beobachtung ist (Differenz zwischen Voraussage und Beobachtung). Zu diesem Zeitpunkt sind die Parameter β_j und die Fehler ε_i noch unbekannt.

Zur Vereinfachung der Darstellung können die folgenden Matrizen eingeführt werden:

$$\underline{y} = \begin{Bmatrix} y_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{Bmatrix}, \underline{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdot & x_{p1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{1n} & \cdot & x_{pn} \end{bmatrix}, \underline{\beta} = \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdot \\ \beta_p \end{Bmatrix}, \underline{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix} \quad [46]$$

Die Gleichung 45 lässt sich dann als Matrixgleichung wie folgt schreiben:

$$\underline{y} = \underline{X}\underline{\beta} + \underline{\varepsilon} \quad [47]$$

Die Methode der kleinsten Quadrate erlaubt es, die Werte der Parameter β_j zu schätzen. Dazu werden diejenigen Parameter β_j gesucht, welche die kleinste Summe der Quadrate der Fehler ergeben, d.h.

$$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p \text{ so dass } (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \dots + \varepsilon_n^2) \text{ minimal wird} \quad [48a]$$

oder in Matrizenform,

$$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p \text{ so dass } \underline{\varepsilon}^T \underline{\varepsilon} = (\underline{y} - \underline{X}\underline{\beta})^T (\underline{y} - \underline{X}\underline{\beta}) \text{ minimal wird} \quad [48b]$$

Der Exponent T bezeichnet die Transposition des Vektors oder der Matrix.

Falls die Matrix $\underline{X}^T \underline{X}$ invertierbar ist, gilt für die Schätzung der Parameter β_j

$$\hat{\underline{\beta}} = (\underline{X}^T \underline{X})^{-1} \underline{X}^T \underline{y} \quad [49]$$

Die Methode der kleinsten Quadrate ist eine zuverlässige Methode, falls bezüglich der Fehler $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ die folgenden drei Hypothesen erfüllt sind:



- a. die Fehler sind unverzerrt¹² im dem Sinne, dass der Erwartungswert $E(\varepsilon_i)=0$ für $i=1, 2, \dots, n$;
- b. die Fehler haben alle (mehr oder weniger) dieselbe Varianz¹³, d.h. $var(\varepsilon_i)=\sigma^2=konstant$;
- c. es besteht keine Korrelation zwischen den Fehlern, d.h. $cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j)=corr(\varepsilon_i, \varepsilon_j)=0$ für $i \neq j$ mit cov als Symbol für die Kovarianz¹⁴.

Es wird daran erinnert, dass hier nur die n ersten Beobachtungen berücksichtigt werden, d.h. diese Beobachtungen dienen zum *Aufbau* des Modells für den statistischen Soll-Ist-Vergleich.

Physikalisch kann der Umstand, dass eine dieser Hypothesen nicht ganz erfüllt ist, die folgenden Ursachen haben:

- a. eine nicht modellierte Veränderung, die während der Periode der n Beobachtungen eintritt und einen systematischen Fehler verursacht (Beispiel: Nichtanpassen des Modells bei einer Staumauererhöhung);
- b. eine nicht modellierte Veränderung, die während der Periode der n Beobachtungen eintritt und durch welche die zufällige Verteilung der Fehler beeinflusst wird (Beispiel: Auftreten von Abweichungen bei Messgeräten);
- c. eine im Modell nicht berücksichtigte massgebende Variable, wodurch der Fehler bei einer spezifischen Beobachtung teilweise vom Fehler bei einer anderen Beobachtung abhängig gemacht wird (Beispiel: Vernachlässigung des Temperatureinflusses bei einer Talsperre, die stark auf Temperaturänderungen reagiert).

In der Praxis begnügt man sich in der Regel damit, empirisch zu „garantieren“, dass die vorangehend aufgeführten Hypothesen erfüllt sind. Ein vernünftiges Verhalten wird einerseits durch die auf physikalischen Grundsätzen beruhende Wahl der Modellvariablen (z.B. die radialen Verschiebungen der Mauerkrone einer Betontalsperre werden vom Wasserstand gemäss einem Polynom vierten Grades beeinflusst) sichergestellt; andererseits wird dies durch die „geschickte“ Wahl der für die Schätzung der Parameter nach der Methode der kleinsten Quadrate verwendeten Beobachtungen gewährleistet. Bei der „geschickten“ Wahl ist darauf zu achten, dass in der Beobachtungsperiode kein abnormales Verhalten auftritt, aber deutliche Variationen der massgebenden Variablen und eine genügende Anzahl von Beobachtungen vorhanden sind. Bei einer zu geringen Anzahl von Beobachtungen ist die Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate nicht möglich; bei einer zu hohen Anzahl von Beobachtungen kann nicht erwartet werden, dass die physikalischen Verhaltensgesetze während der betrachteten Periode konstant bleiben. Die Erfahrung des Ingenieurs erlangt bei dieser Wahl eine ausschlaggebende Bedeutung.

Die Länge der zur Kalibrierung des Modells notwendigen Beobachtungsperiode hängt von der Zahl der zu schätzenden Parameter, der Anzahl der Messungen pro Jahr und der Qualität der Messungen ab. Einzelne Autoren schlagen die Verwendung von vier bis fünf Mal mehr Messungen als die zu schätzenden Parameter vor. Andere sind der Ansicht, dass man über zehn Mal mehr Messungen als Parameter verfügen muss. Die Berücksichtigung von fünf Jahreszyklen

¹² Eine unverzerrte Schätzung gibt im Mittel, d.h. bei wiederholter Anwendung, die richtige Antwort. Eine solche Schätzung kann auch als erwartungstreu bezeichnet werden.

¹³ Die *Varianz* ist ein Mass für die Veränderlichkeit einer Variablen.

¹⁴ Die *Kovarianz* ist ein Mass für die gegenseitige Abhängigkeit zweier Variablen.



scheint aber in allen Fällen das Minimum darzustellen, an welches einige Zyklen für die Überprüfung der Qualität des Modells angehängt werden können.

Die Beobachtungen müssen alle Wertkombinationen abdecken, welche die Variablen während des Betriebs annehmen können (insbesondere Wasserstand, Temperatur und Jahreszeit).

Unter diesen Bedingungen berechnet sich die Kovarianzmatrix der Schätzungen der Parameter β_j wie folgt:

$$\text{var}(\hat{\beta}) = \sigma^2 (\underline{X}^T \underline{X})^{-1} \quad [50]$$

4.3 Gültigkeit eines Modells: Statistische Tests

Die Statistik bietet verschiedene Möglichkeiten an, um die Gültigkeit eines Modells zu testen. Insbesondere kann die Bedeutung jedes einzelnen Koeffizienten $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ geprüft werden; d.h. es kann bestimmt werden, ob ein Modell, das die Variable X_k einschliesst, im probabilistischen Sinn besser ist als ein Modell, das auf diese Variable verzichtet (z.B. ob ein Modell zur Voraussage der Kronenverschiebungen einer Betontalsperre, das den Einfluss des Wasserstandes mit Hilfe eines Polynoms vierten Grades berücksichtigt, besser ist als ein Modell, das sich mit einem Polynom dritten Grades begnügt).

Für die Überprüfung kann ein Student-Test t oder allgemeiner ein Fisher-Test F verwendet werden.

4.3.1 Multikolarität und Varianz-Inflations-Faktor VIF

In der Praxis verwenden viele Ingenieure regressive Modelle, die zu viele Prognosevariable enthalten. Dies um das Bestimmtheitsmass R^2 zu maximieren und die Standardabweichung der Voraussage zu minimieren¹⁵. So sieht man Modelle, die zusätzlich zu den vier trigonometrischen Termen der Gleichung 21, welche die Temperaturzyklen modellieren, noch Messungen von mehreren Betonthermometern enthalten. Die Mehrzahl dieser Temperaturvariablen korreliert mehr oder weniger stark. Dies bedeutet, dass viele der Variablen grundsätzlich die gleiche Information liefern. Dies wird als *Multikolarität* bezeichnet. Diese Überbestimmtheit schafft instabile Modelle (in der Terminologie der Statistik sind sie *nicht robust*). Bei der Voraussage haben diese Modelle die Tendenz, stark verzerrte Resultate zu liefern, sobald die „Konstellation“ der für eine bestimmte Variable gemessenen Werte den Bereich der Kalibrierungsperiode verlässt.

Der *Varianz-Inflations-Faktor VIF* ist eine statistische Grösse, die Multikolaritäten aufzeigt und folglich das Erstellen von nicht robusten Modellen verhindert.

4.3.2 Analyse der Residuen

Die für die Fehler aufgestellten Hypothesen können mit einer graphischen oder numerischen Analyse der Residuen kontrolliert werden. Mit dem Begriff *Residuen* werden diejenigen Fehler bezeichnet, die nach der Kalibrierung mit der Methode der kleinsten Quadrate verbleiben. Es ist möglich, die Hypothese der Nicht-Korrelation der Residuen mit Hilfe eines Durbin-Watson-Tests oder einfach durch Aufzeichnen der Residuen in Funktion der Zeit zu kontrollieren. Falls die Grafik

¹⁵ Der Koeffizient R^2 ist das Verhältnis der Varianz der vorausgesagten Werte zur Varianz der gemessenen Werte.



eine Periodizität in der Entwicklung der Residuen zeigt — eine in der Praxis oft beobachtete Tatsache — bedeutet dies, dass eine Komponente mit dem Modell nicht richtig berücksichtigt wird.

Mit Hilfe dieser Grafik lässt sich auch feststellen, ob die Residuen eine Tendenz in Funktion der Zeit besitzen. Durch Aufzeichnen der Residuen in Funktion der unterschiedlichen Prognosevariablen und in Funktion der Prognosewerte kann überprüft werden, ob sie auch nicht von diesen Variablen abhängig sind. Alternativ können diese Kontrollen auch numerisch durch Korrelation der Residuen mit der Zeit (Datum der Beobachtungen) und mit den verschiedenen Variablen erfolgen.

4.4 Zulässige Abweichungsbereiche

Normalerweise wird der Wert y_i einer Messung i als „erwartet“ bezeichnet, wenn die Differenz zwischen ihm und dem mit Hilfe des Modells vorausgesagten Wert kleiner ist als ein Wert d :

$$|\varepsilon_i| = |y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_{1i} - \hat{\beta}_2 x_{2i} - \dots - \hat{\beta}_p x_{pi}| < d \quad [51]$$

Folglich wird der Wert y_i einer Messung i als „unerwartet“ bezeichnet, wenn diese Differenz grösser ist als d (dies erfordert eine Analyse der Ursachen der Abweichung). Der Wert d wird normalerweise als Vielfaches der Standardabweichung σ der bei der Kalibrierung erhaltenen Residuen gewählt. Die Schätzung der Standardabweichung ist gegeben durch

$$\hat{\sigma} = \sqrt{(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_n^2)/(n - p - 1)} \quad [52]$$

Die Wahl der zulässigen Differenz d (zum Beispiel $d = 2\sigma$) ist Aufgabe des verantwortlichen Ingenieurs und des allfälligen Experten (und muss von der Überwachungsbehörde genehmigt werden). Sie kann für die unterschiedlichen Verhaltensindikatoren, unter anderem mit Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der Messinstrumente, variieren. Es ist nicht sinnvoll, den zulässigen Wert pauschal und ohne Berücksichtigung weiterer Einflüsse als Vielfaches der Standardabweichung festzulegen. Der aktuelle Betrag der Standardabweichung sollte ebenfalls mitberücksichtigt werden (insbesondere ist eine „grosse“ Standardabweichung nicht mit einem präzisen Voraussagemodell kompatibel).

Wenn der Wert y_i gemäss diesem Kriterium unzulässig ist, bedeutet dies noch keineswegs, dass die Struktur der Talsperre bedroht ist, sondern nur, dass ihr Verhalten nicht den Erwartungen entspricht. Auch hier ist es Aufgabe des verantwortlichen Ingenieurs und eines allfälligen Experten zusätzliche Abklärungen durchzuführen.

Mit den Hypothesen a bis c des Abschnitts 4.2, wird gezeigt, dass $\hat{\sigma}$ ein erwartungstreuer Schätzwert der Standardabweichung σ ist. Der Nenner $n - (p + 1)$ erklärt sich durch den Verlust von $p + 1$ Freiheitsgraden infolge der Schätzung von $p + 1$ Parameter.

4.5 Plausibilität

Lombardi (1992) unterscheidet zwischen zwei Typen zur Kontrolle der Plausibilität von Messungen:

- Bei der Plausibilitätskontrolle des *historischen* Typs wird eine beobachtete Variationsbreite festgelegt. Jede Messung der Variablen, deren Wert ausserhalb dieser Variationsbreite liegt,



wird als zweifelhaft betrachtet und sofort überprüft. Dies kann beispielsweise der Fall sein für eine Betontemperaturmessung, bei welcher die historischen Grenzen in Funktion der Jahreszeiten bekannt sind.

- Bei der Plausibilitätskontrolle des *Korrelations*-Typs werden zwei Variablen miteinander in Beziehung gesetzt. Man kann dann eine bestimmte Korrelation und ein Vertrauensintervall festlegen und zur Identifikation von fehlerhaften Messungen benutzen. Bei dieser Korrelation kann es sich z.B. um das Verhältnis zwischen den an der Mauerkrone mit Pendeln gemessenen Verschiebungen und den am selben Punkt mit Klinometern bestimmten Rotationen handeln.

4.6 Bemerkung zur Verwendung der Statistik in der Praxis

4.6.1 Normalisierung der Variablen

Im Allgemeinen wird empfohlen, die Variablen in normalisierter Form zu verwenden, insbesondere der bezüglich der totalen Mauerhöhe H normalisierte Wasserstand h

$$h \rightarrow \frac{h}{H} \quad [53]$$

Noch wichtiger ist es aber, den Wasserstand ab dem Fuss der Talsperre (oder besser ab der Mauermitte) zu messen, anstatt die Höhe über Meer zu verwenden.

Die Verwendung von normalisierten Variablen ist aus statistischer Sicht nicht erforderlich; sie erweist sich aber oft aus numerischer Sicht als vorteilhaft.

4.6.2 Fehlende Messungen

Die zur Verfügung stehenden Messungen der massgebenden Variablen können unvollständig sein (einzelne Werte aus einer Messkampagne fehlen, z.B. einige der im Modell verwendeten Temperaturmessungen). Wenn nur wenige Messwerte fehlen, kann auf die Verwendung der entsprechenden Messungen verzichtet werden (falls z.B. die Messung x_{p2} fehlt, entfällt in der Gleichung 45 die zweite Zeile). Fehlen aber zahlreiche Messwerte, so kann es erforderlich werden, sie durch Interpolation mit den nächstliegenden Werten (geometrisch oder zeitlich) zu vervollständigen; alternativ können fehlende Werte analog zu Messdaten, die bei vergleichbaren Bedingungen bestimmt wurden, ergänzt werden. Dies sollte aber eine Ausnahme bleiben.



5 Darstellung des Vergleichs

5.1 Beobachtung

Einfache Grafiken mit Darstellung der Bruttomessdaten in Funktion der Zeit — das heisst von $M(t,env)$ — reichen für die Überwachung von grösseren, irreversiblen Geländeverschiebungen oder von bedeutenderen Bewegungen bei Talsperren, die auf Temperaturvariationen und Schwankungen des Wasserstandes wenig empfindlich sind (z.B. Setzung bei Dämmen). Es ist auch möglich, die zeitliche Entwicklung mit gleitenden Mittelwerten (Mittel der zwölf vergangenen Monate) darzustellen. Diese Darstellungen sind aber nicht geeignet für die Überwachung von Talsperren, die auf andere Einflüsse als die Zeit reagieren. Wegen der umfassenden Verfügbarkeit von leistungsfähigen Rechnern ist heute eine Beschränkung auf solche, einfache Grafikdarstellungen nicht mehr gerechtfertigt.

Auch die grafische Darstellung eines Verhaltensindikators (z.B. die Radialverschiebung der Krone einer Bogenmauer) in Funktion des Wasserstandes kann eine nützliche Information geben. Sie ist aber nur partiell und deshalb ungenügend.

5.2 Beobachtungen und Voraussagen

Der Vergleich zwischen gemessenen und vorausgesagten Werten muss mit Hilfe von Grafiken visualisiert werden, welche die gemessenen Werte $M(t,env)$, die vorausgesagten Werte $P(t,env)$ und den Unterschied $D(t,env)$ zwischen den beiden zeigen. Dabei ist die Gleichung 1 als Ausgangspunkt zu benutzen. Diese Gleichung kann auch wie folgt geschrieben werden:

$$D(t,env) = M(t,env) - P(t,env) \quad [54]$$

Die Vergleichsgrössen können in Funktion der Zeit oder in Funktion anderer Umweltvariablen (z.B. Wasserstand im Stausee) dargestellt werden. So können unerwartete, unzyklische Entwicklungen leicht erkannt werden. Es wird empfohlen, die einzelnen Komponenten der Voraussage gemäss Gleichung 2 oder 5 darzustellen.

5.3 Kompensierte Verschiebungen oder Vergleichsverformungen

5.3.1 Prinzip

An Stelle der direkten Darstellung der Differenz $D(t,env)$ in Funktion der Zeit entsprechend der Gleichung 54, kann sie auch mit einer Konstante c^{ste} kombiniert dargestellt werden

$$D(t,env) + c^{ste} \quad [55]$$

Die Konstante c^{ste} wird als Voraussage der Verhaltensindikatoren für die willkürlich gewählten Bezugswerte der Umweltvariablen (Index 0)

$$c^{ste} = P(env_0) \quad [56]$$

festgelegt.



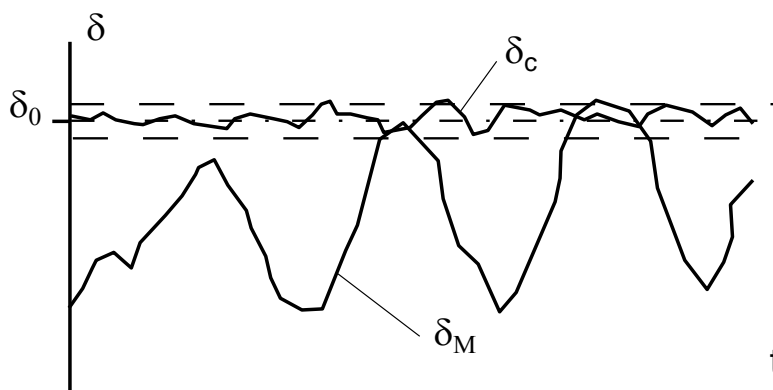
Damit ergibt sich die folgende Beziehung:

$$\begin{aligned} D(t, env) + c^{ste} &= M(t, env) - P(t, env) + c^{ste} \\ &= M(t, env) - (P(t, env) - P(env_0)) \end{aligned} \quad [57]$$

Wenn nur die reversiblen Einflüsse der Wasserstands- und Temperatur-Schwankungen (siehe Gleichung 34) interessieren, resultiert die Formel

$$\begin{aligned} D(t, env) + P_{h,r}(h_0) + P_{\theta,r}(\theta_0) &= \\ M(t, env) - (P_{h,r}(t, h) - P_{h,r}(h_0)) - (P_{\theta,r}(t, \theta) - P_{\theta,r}(\theta_0)) \end{aligned} \quad [58]$$

Ein Beispiel für diese Darstellungsart wird in der Figur 14 für die Verschiebung δ eines Pendels gegeben.



Figur 14 – Vergleich zwischen Bruttoverschiebungen und kompensierten Verschiebungen:

δ_0 : Bezug = $P(env_0)$
 δ_M : gemessen = $M(t, env)$
 δ_c : kompensiert = $M(t, env) - ((P(t, env) - P(env_0)))$

5.3.2 Bedeutung

In der Gleichung 58 stellt der Term $P_{h,r}(t, h) - P_{h,r}(h_0)$ die Differenz zwischen der Voraussage der Verformung für einen Wasserstand h und der Verformung für den Bezugswasserstand h_0 dar. Dasselbe gilt für die Verschiebungskomponente infolge Temperaturvariation. Man „kompensiert“ also die Messung durch die Differenz zwischen der Voraussage des Verhaltens unter den momentanen Umweltbedingungen und derjenigen unter den Referenzbedingungen. Dadurch werden die gemessenen Verhaltensbeobachtungen auf konstante Referenzbedingungen¹⁶ transferiert.

Wenn die so kompensierten Verschiebungen mit der Zeit zu- oder abnehmen, so bedeutet dies, dass die Talsperre anderen Einflüssen ausgesetzt ist. Sie können generell als *Alterung* bezeichnet werden, die es zu überwachen gilt. Diese Alterung kann unterschiedliche Ursachen haben: z.B. Kriechen des Betons und der Fundation, zeitbedingten Veränderungen der Materialeigenschaften infolge Abnutzung, Rissbildung, Sättigung, Alkali-Aggregat-Reaktion, usw.

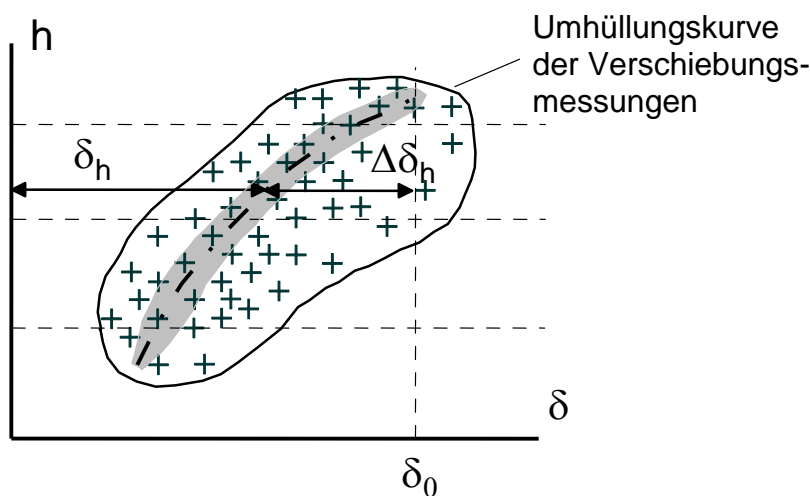
¹⁶ Zur Beschreibung dieser Darstellungsart wird in der Literatur oft auch die Bezeichnung *rekonstruierte konstante Bedingungen* verwendet.



5.3.3 Grafisches Verfahren zur Voraussage des Verhaltens P

Die Voraussage eines Verhaltensindikators erfolgt manchmal mit Hilfe der nachstehenden grafischen Anpass-Methode. Sie ist nicht direkt mit der Darstellung der kompensierten Verschiebungen verbunden, wird in der Praxis aber meist in diesem Zusammenhang angetroffen. Deshalb wird sie hier und nicht im Abschnitt 2.4 oder im Kapitel 3 beschrieben. Die Figur 15 illustriert die Anwendung der Methode für die Bestimmung der Verschiebung δ eines Pendelmesspunktes bei dem nur die Einflüsse von Wasserstands- und Temperaturschwankungen berücksichtigt werden.

Die während einiger Jahre gemessenen Berg-Tal-Verschiebungen werden in Funktion des Seestandes aufgezeichnet. In der Figur 15 ist jede einzelne Messung mit einem Kreuz gekennzeichnet. Für ein durch den gleichen Seestand gebildetes Verschiebungspaar — eine Verschiebung beim Aufstauen, die andere beim Abstauen — wird die Temperaturkompensation bestimmt, die notwendig ist, um die zum Messzeitpunkt herrschende Temperatur auf die dem langfristigen Mittel entsprechende Referenztemperatur zu korrigieren. Daraus ergibt sich ein neues, teilweise kompensiertes Verschiebungsdiagramm. Dieses umfasst nunmehr nur ein sehr schmales Werteband (graue Zone in der Figur 15). Anschliessend wird die Mittelkurve dieser Zone als durchschnittlicher Verlauf der Berg-Tal-Verschiebung in Funktion des Seestandes für eine konstante Referenztemperatur angenommen. Die Verschiebung δ_h , die aus dem Diagramm für den Seestand h abgelesen wird, ist nur noch von diesem Seestand abhängig, und charakterisiert so dessen Einfluss.



Figur 15 – Anpass-Methode.

In einem zweiten Schritt kann der Wasserstand fiktiv von der Kote zum Zeitpunkt der Messung auf eine andere willkürlich gewählte Kote umgerechnet werden. Falls δ_0 den Verschiebungswert für den Referenzwasserstand bezeichnet, beträgt die Kompensation

$$\Delta\delta_h = \delta_0 - \delta_h \quad [59]$$

Die Grösse $\Delta\delta_h$ entspricht der hydrostatischen Komponente der im Abschnitt 5.3.1 eingeführten Konstante c^{ste} .

5.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die grafische Darstellung



- der unabhängigen Variablen X in Funktion der Zeit,
- der Beobachtungen M in Funktion der Zeit,
- der Voraussagen P in Funktion der Zeit,
- der Komponenten der Voraussage in Funktion der Zeit,
- der Differenzen D zwischen Beobachtungen und Voraussagen in Funktion der Zeit und
- der zulässigen Abweichungsbereiche (Vertrauensintervalle)

kohärente Anhaltspunkte für die (partielle) Beurteilung des Verhaltens des Bauwerkes.

Soll-Ist-Vergleiche sind aber nur ein Element eines umfassenden Sicherheitskonzepts; bei der Beurteilung des Verhaltens eines Bauwerkes müssen auch andere Elemente berücksichtigt werden (Biedermann 1997).



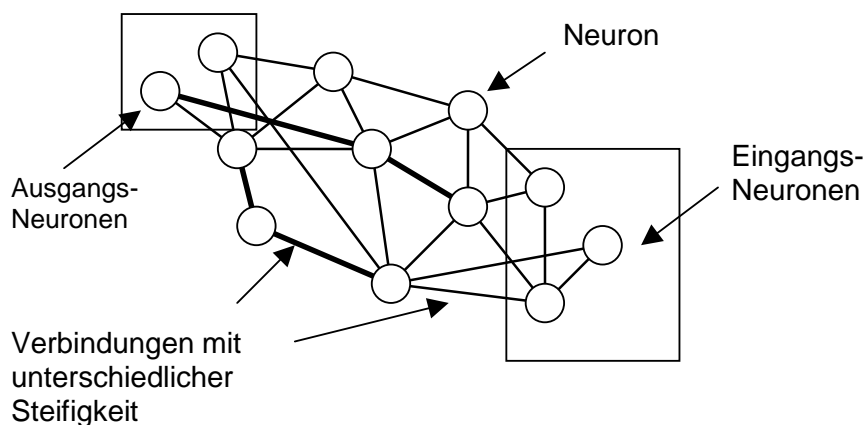
6 Neue Methoden

6.1 Neuronennetz

Neuronennetze, ursprünglich durch ihr biologisches Homonym inspiriert, bieten bei intelligenten Informationsprozessen sowohl für das Erfassen, Speichern und Erlernen als auch für die fundamentalen Rechenmechanismen einen neuen, generellen Modellansatz. Ein Neuronennetz besteht aus zahlreichen, einfachen Interkommunikationseinheiten, Neuronen genannt. Sie arbeiten parallel, um ein bestimmtes Problem zu lösen. Die Tatsache, dass das Netz nach seiner erstmaligen Definition durch Imitation der biologischen Neuronensysteme selbständig lernen kann, macht diesen Ansatz sehr interessant. Die internen Charakteristiken des Netzes müssen nicht im Voraus festgelegt werden. Sie ergeben sich stattdessen aus dem Lernprozess des Systems in Funktion der vom Anwender gelieferten Daten: Somit entwickelt sich das Modell aufgrund einer vorgegebenen Prozedur selbst entsprechend seiner während der Lernzeit gemachten Erfahrungen. Sobald das konsolidierte Modell besteht, kann es für Probleme mit unbekannter Lösung verwendet werden. Die erfolgreiche Anwendung eines Neuronennetz-Modells für die Voraussage des Talsperrenverhaltens setzt jedoch immer die Kenntnis derjenigen Faktoren voraus, die das Verhalten beeinflussen.

Ein künstliches Neuron ist ein Element, das die gewichtete Summe von Eingangsdaten berechnet, die den Zustand von anderen Neuronen beschreiben. Die Gewichtungsfaktoren (oder Steifigkeiten der Verbindungen) stehen für die zwischen den Neuronen übertragene Information. Dieser Übertragungsprozess erfolgt mit Hilfe einer logischen Transferfunktion.

Die Figur 16 zeigt schematisch ein Neuronennetz. Es besitzt Eingangs- und Ausgangs-Neuronen, die mit der Umgebung interagieren. Zu Beginn werden die Steifigkeiten der Transferfunktionen willkürlich festgelegt. Anschliessend erfolgt kontinuierlich eine Anpassung mit dem Ziel, das Verhalten zu verbessern.



Figur 16 – Neuronennetz.

Ein Neuronennetz besitzt drei wichtige Attributtypen:

- die Architektur und Topologie des Netzes,
- die Transferfunktion und ihre Parameter sowie
- den Lernalgorithmus.



Die Wahl der Architektur ist extrem wichtig. Sie beeinflusst die generelle Leistungsfähigkeit des Systems. Aus Beispielen gewonnene Informationen werden in versteckten Schichten („hidden layers“) sowie in den Verbindungen zwischen diesen Schichten gespeichert und bearbeitet. Falls die versteckten Schichten aus zu vielen Neuronen bestehen, werden nur die während der Lernphase verwendeten Beispiele als mögliche Optimal-Lösungen für andere Probleme verwendet. Im Gegensatz dazu hat ein System mit zu wenig Neuronen in den versteckten Schichten keine Lernfähigkeit und wird somit wertlos.

Anwendungen von Neuronennetzen zur Voraussage des Talsperren-Verhaltens wurden von Bossoney (1995) und Hattingh & Oosthuizen (1998) erarbeitet.

6.2 Mathematical Model of Multiple Survey Points

Bei den vorangehend behandelten statistischen und hybriden Modellen wird eine vollständige statistische Analyse separat für jeden einzelnen Kontrollpunkt durchgeführt; sie ist unabhängig von der Analyse der benachbarten Kontrollpunkte. Jinping & Zhenzhao (1998) nennen dies „Mathematical Models of Single Survey Points“ („Mathematische Modelle mit unabhängigen Kontrollpunkten“). Sie schlagen vor, die Punkte mit organischen Beziehungen zu verbinden und bezeichnen dies als „Mathematical Model of Multiple Survey Points“ („Mathematisches Modell mit gekoppelten Kontrollpunkten“). Damit kann eine erwartete räumliche Beziehung wiedergegeben werden. In ihrer Veröffentlichung zeigen Jinping & Zhenzhao die Anwendung für eine Gewichtsstaumauer.

6.3 Kalman-Filter

Verschiedene Autoren haben noch fortgeschrittenere Techniken ins Auge gefasst. Hasegawa & Murakami (1985) verwenden beispielsweise eine Methode mit einem Kalman-Filter. Dabei werden die Modellparameter mit Hilfe der Beobachtungen in sukzessiver Weise und unter Berücksichtigung von Mess- und Modellfehlern angenähert.



7 Schlussbemerkungen

7.1 Vergleich der Methoden

Der Berichterstatter für die Frage 56 am 15. ICOLD-Kongress Post (1985) bestätigt die mehr oder weniger allgemeine Zufriedenheit der Beitragsautoren mit der guten Übereinstimmung zwischen Voraussage und Beobachtung (Messung). Er betont aber, dass diese Übereinstimmung nicht in jedem Fall vorhanden ist, und dass einige Autoren verschiedene Korrekturen erwähnen, die sie an ihren Berechnungen anbringen mussten, um die Theorie der Realität anzupassen. Viele Autoren verheimlichen auch nicht die verbleibenden Differenzen zwischen Berechnung und Messung. Erfahrungen von Silva Gomes & Silva Matos (1985) zeigen, dass es sehr schwierig oder sogar unmöglich ist, ein bestimmtes Modell und eine bestimmte Methode zu empfehlen, die für alle Situationen geeignet sind. Es wird darauf hingewiesen, dass die Charakteristiken der zu analysierenden Messungen, die zu untersuchende Betriebsperiode der Talsperre und die zur Verfügung stehende Zusatzinformation die Wahl der Methode beeinflussen. Ein Vergleich der Vorteile und Grenzen der verschiedenen Methoden ist deshalb besonders wichtig.

Es soll hier daran erinnert werden, dass Voraussagen für in der Projektierungsphase stehende Talsperren nur mit der deterministischen Methode möglich sind. Selbst mit dieser Methode ist die Voraussage des Verhaltens einer Talsperre beim Ersteinbau eine sehr heikle Aufgabe, weil

- a. die Materialeigenschaften oft nicht genügend gut bekannt sind (Mittelwerte, Streuungen),
- b. der Ersteinbau in Etappen und oft vor der Fertigstellung der Talsperre erfolgt und
- c. die Nullmessung deshalb für jeden Messpunkt unterschiedlich ist und manchmal bereits vor dem Abschluss der Bauarbeiten erfolgt.

Die statistische Methode ist vergleichsweise einfach anzuwenden. Theoretisch gibt sie aber nur für den Bereich der während der Kalibrierungsphase gemessenen Werte realistische Resultate. Die Voraussage des Verhaltens einer Talsperre in ungewöhnlichen Situationen, wie z.B. während einer Beckenentleerung oder bei einem aussergewöhnlich hohen Wasserstand, ist deshalb weniger zuverlässig. Solche Situationen lassen sich am besten mit der hybriden Methode behandeln. Es besteht aber keine Garantie, dass diese Methode in allen Fällen, wo die Belastung den üblichen Bereich verlässt, besser ist.

7.2 Computer-Programme

Der Soll-Ist-Vergleich eignet sich sehr gut für die Computer-Programmierung, insbesondere gilt dies für die statistische und für die hybride Methode. Die entsprechenden Programme erlauben meist nicht nur die Durchführung der notwendigen mathematischen Operationen (inklusive Statistik), sondern auch die Verwaltung der Messdaten, siehe Hepp (1998), Crépond & Lino (1999), Lombardi SA, Leroy & Hagin (2000).

7.3 Kommentar

Die hohe Komplexität des von einer Talsperre und ihrer Umgebung gebildeten Systems macht deterministische Verhaltensvoraussagen sehr schwierig. Deshalb beschränkt sich der bevorzugte Anwendungsbereich der deterministischen Modelle auf den Ersteinbau und die ersten



Bewirtschaftungsjahre, d.h. die Periode in der das Fehlen von Messdaten die Verwendung von hybriden oder statistischen Modellen ausschliesst.

Der Unterschied zwischen der hybriden und der statistischen Methode ist in Wirklichkeit gering. Er besteht einzig in der Wahl der Einflussfunktionen. Auch bei einem statistischen Modell dürfen die physikalischen Gegebenheiten nicht ausser Acht gelassen werden. Die statistisch-mathematische Analyse ist bei beiden Methoden gleich.

Die grössten Schwierigkeiten beim Erstellen eines Modells ergeben sich in der Regel bei der Berücksichtigung der Temperatureffekte (Beton-Talsperren). Es wäre sehr wünschenswert, dass sich die Forschung diesem Problem annehmen würde. Weitere Forschungsthemen sollten Untersuchungen zu den ebenfalls schwierig zu erfassenden Verzögerungseffekten und Langzeiteinflüssen sein.

Die Statistik kennt eine Vielzahl von Gesetzen und Theoremen, die in der Praxis leider nur zum Teil genutzt werden. Dieser Missstand liesse sich durch vermehrte Anstrengungen in Richtung einer vertieften statistischen Formalisierung des Soll-Ist-Vergleiches beheben. Die Kenntnisse dazu wären vorhanden.

Schliesslich muss festgestellt werden, dass sich in der Schweiz die praktische Anwendung von Soll-Ist-Vergleichen bisher weitgehend auf Beton-Talsperren beschränkt. Der Einsatz bei Dämmen sollte in Zukunft gefördert werden.

7.4 Empfehlungen für die Anwendung

Aus dem in diesem Dokument Gesagten geht klar hervor, dass sowohl die Wahl der für eine Talsperre und eine bestimmte Situation am besten geeigneten Vergleichsmethode als auch des dazu passenden Voraussagemodells im Verantwortungsbereich des Ingenieurs liegt. Seine Wahl ist nicht willkürlich. Sie muss sich auf die physikalischen Prozesse (mechanische, thermodynamische und chemische), die das Verhalten der Talsperre bestimmen, und die zur Verfügung stehenden Informationen (Materialien und Verhalten) Rücksicht nehmen. Es können dazu die folgenden Leitlinien gegeben werden:

- Die Basisformel lautet

$$M(t, env) = P(t, env) + D(t, env) \quad [1]$$

- Die *hybride Methode* ist am besten geeignet, die Eigenheiten des Bauwerks und die Geschichte seines Verhaltens zu berücksichtigen. Sie ist wenn immer möglich anzuwenden.
- Falls die Geschichte des Verhaltens unbekannt oder nur ungenügend dokumentiert ist (z.B. erste Jahre nach der Inbetriebnahme oder bei Fehlen von Messungen), ist die *deterministische Methode* am besten geeignet.
- Falls die Geschichte des Staumauerverhaltens bekannt ist, aber kein deterministisches Modell zur Verfügung steht (und seine Erarbeitung nicht mit dem Gefährdungspotential der Talsperre gerechtfertigt werden kann), sollte die *statistische Methode* angewendet werden. Die folgenden Formeln (deren Gültigkeit von Fall zu Fall nachzuweisen ist) dienen als Ausgangspunkt für die Voraussage der Bewegungen einer Beton-Talsperre:
 - wenn Messungen der Betontemperatur zur Verfügung stehen (was wünschenswert ist)

$$P(t, env) = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4 + a_5 (1 - e^{-t}) + \sum_{k=1}^K b_k \theta_k \quad [60]$$



Damit das Modell robust bleibt (siehe Abschnitt 4.3), dürfen nicht zu viele Temperaturvariablen eingeführt werden.

- wenn keine Betontemperaturmessungen zur Verfügung stehen

$$P(t, env) = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4 + a_5 (1 - e^{-t}) + a_6 \cos s + a_7 \sin s + a_8 \cos 2s + a_9 \sin 2s \quad [61]$$

- Falls ein mechanisches Verhaltensmodell für die Talsperre unter hydrostatischer Belastung besteht, nicht aber für den Einfluss der Temperatur (oder geeignete Messungen für letztere nicht vorhanden sind), eignet sich die *gemischte Methode* am besten.
- Mit der graphischen Darstellung der folgenden Elemente lässt sich der Soll-Ist-Vergleich am besten dokumentieren:
 - Unabhängige Variablen X in Funktion der Zeit,
 - Beobachtungen M in Funktion der Zeit,
 - Voraussagen P in Funktion der Zeit,
 - Komponenten der Voraussage in Funktion der Zeit,
 - Differenzen D zwischen Beobachtungen und Voraussagen in Funktion der Zeit und
 - zulässige Abweichungsbereiche (Vertrauensintervalle).

7.5 Synthese

Die wichtigsten Punkte des vorliegenden Dokuments lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die statistische Methode kann verhältnismässig einfach angewendet werden. Eine sinnvolle Wahl der Einflussfunktionen erlaubt die Voraussage unterschiedlichster Verhaltensindikatoren. Die Voraussage kann aber fehlerhaft sein, wenn die Werte der Modellvariablen ausserhalb des Bereichs der für die Kalibrierung verwendeten Messungen liegen.
- Die deterministische Methode vernachlässigt alle Erkenntnisse aus dem vergangenen Verhalten des Bauwerks. Sie stützt sich ausschliesslich auf die geometrische und physikalische Modellierung der Talsperre. Sie ist aber die einzige Methode, die während der ersten Betriebsjahre angewendet werden kann.
- Die hybride Methode kombiniert die Eigenheiten der statistischen und der deterministischen Methode. Dadurch sollte sie am besten in der Lage sein, das Verhalten der Talsperre vorauszusagen, wenn die Werte der Modellvariablen ausserhalb des Bereiches der Kalibrierungsphase liegen.
- Die gemischte Methode ist eine gleichzeitige Anwendung der deterministischen und statistischen Methode.
- Die Statistik bietet die Möglichkeit, die Bedeutung der verschiedenen, ausgewählten Modellparameter zu prüfen (statistische und hybride Methode). In der Praxis wird von dieser Möglichkeit leider zu selten Gebrauch gemacht.
- Die Berücksichtigung der Temperatureinflüsse (Lufttemperaturen mit zeitlicher Verzögerung) ist ein heikles Unterfangen. In der Literatur werden dafür zahlreiche Ansätze beschrieben.
- Verzögerte Wirkungen und Langzeiteinflüsse (z.B. Kriechen) werden in der Praxis immer vereinfacht berücksichtigt.



- Welche Methode auch immer verwendet wird, im Zentrum des Analyseprozesses sollten stets die physikalischen Gegebenheiten des aktuellen Problems stehen.



8 Anwendungsbeispiele

Verschiedene Autoren behandeln die Verhaltensanalyse mit Hilfe des Soll-Ist-Vergleichs, siehe z.B. Bianchi & Bremen (2000) und Bremen & Bianchi (2000). Die von Electricité de France auf diesem Gebiet gemachten Erfahrungen sind von Le May et al. (1985) zusammengefasst worden.

Nachfolgend werden zwei Beispiele präsentiert, welche die Anwendung der in diesem Bericht beschriebenen Methoden bei zwei schweizerischen Talsperren veranschaulichen. Es handelt sich dabei um

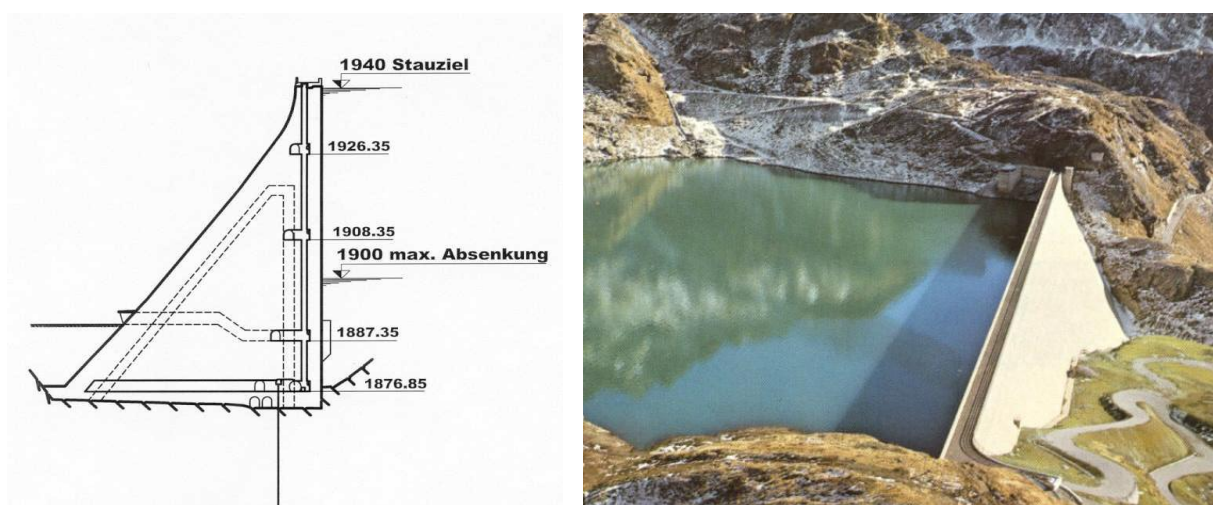
- Abschnitt 8.1: Deterministische und hybride Methode, angewendet für die Gewichtsmauer Robiei (erarbeitet durch E. Ammann);
- Abschnitt 8.2: Statistische Methode, angewendet für die Gewichtsbogenmauer Spitalamm (erarbeitet durch R.M. Gunn).



8.1 Deterministische und hybride Methode (Gewichtsmauer Robiei)

8.1.1 Beschreibung des Bauwerks

Die Talsperre Robiei, erbaut in den Jahren 1964 bis 1967, gehört zu den Stauanlagen der Maggia Kraftwerke SA (OFIMA). Sie befindet sich auf einer Höhe von 1900 m ü. M. zuhinterst im Val Bavona, 40 km nördlich von Locarno (Tessin, Schweiz). Es handelt sich um eine gerade Schwergewichtsmauer mit Hohlräumen im Bereich der Blockfugen. Die Talsperre ist auf quarzreichem Bündnerschiefer, der von gneisähnlichen Bündnerschieferschichten und Gneislinsen durchzogen ist, fundiert. Die Höhe der Sperre beträgt maximal 68 m, die Kronenlänge erreicht 360 m und die Mauerdicke variiert zwischen 4.5 m im Kronenbereich und 50 m am Mauerfuss (siehe Figur 17).



Figur 17 – Talsperre Robiei: Schnitt und Foto.

Messeinrichtung

Die Staumauer ist mit vier Pendeln zur Bestimmung der Verformungen der Mauer in radialer und tangentialer Richtung ausgerüstet sowie mit einem Schwimmpendel für die Messung der Verschiebungen des Mauerfusses im Hauptschnitt. An je 12 Bolzenpaaren können mittels Klinometer die Rotationen in radialer und tangentialer Richtung gemessen werden. 18 weitere Bolzenpaare ermöglichen die Messung der Fugenöffnungen. Die Bewegungen von 32 Punkten auf dem luftseitigen Parament werden mit Hilfe eines geodätischen Netzes gemessen. Zudem erlaubt ein Präzisionsnivellement, die Vertikalverformungen des oberen Kontrollganges zu messen.

Insgesamt 24 Thermometer messen die Temperatur der Luft, des Wassers und des Betons. Der Auftrieb wird mit 25 Bohrungen überwacht. Alle Drainagebohrungen sowie der Fusskontrollgang sind mit Apparaten zur Messung des Wasserabflusses ausgerüstet. Zwei Manometer dienen der Messung und Registrierung des Stauspiegels und der Überlaufhöhe.



8.1.2 Vergleich zwischen gemessenen und vorausgesagten Verschiebungen

Nach 17 Betriebsjahren wurden im Jahr 1984 die radialen Verschiebungen zum ersten Mal einem Soll-Ist-Vergleich unterzogen. Heute wird der Vergleich unmittelbar nach jeder Messung durchgeführt.

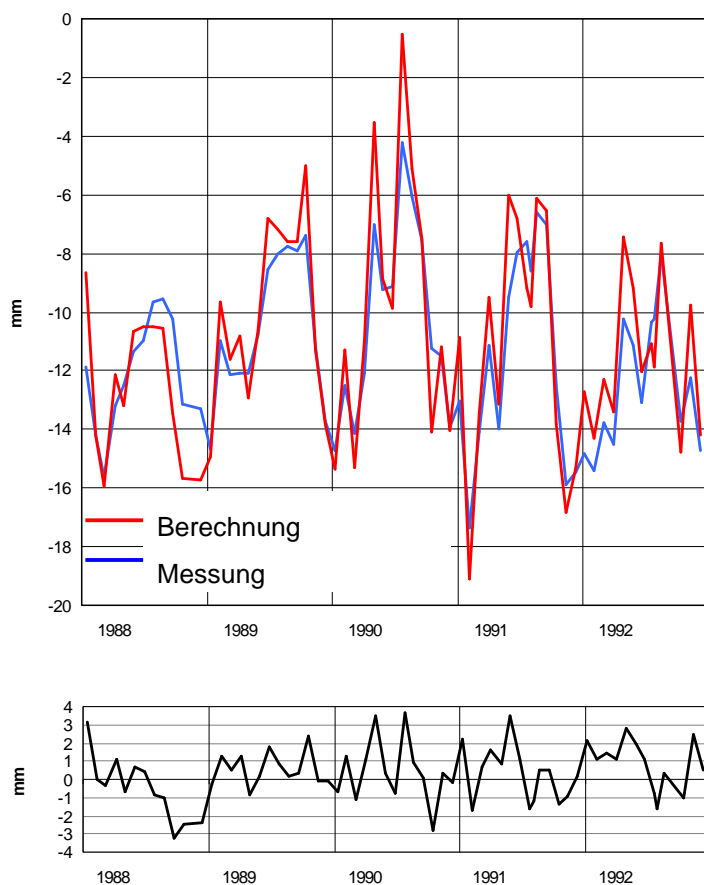
Deterministische Methode

Die Verschiebungen der Mauerkrone im Hauptquerschnitt wurden mit Hilfe eines Finite-Element-Modells berechnet. Dabei wurden folgende Lastfälle berücksichtigt: Eigenlast, hydrostatischer Druck, Auftrieb, Änderung der mittleren Temperatur und des Temperaturgradienten.

Die Eigenlast wurde mit der Dichte 24 kN/m^3 angesetzt. Der Auftrieb wurde zu 80 % des hydrostatischen Druckes angenommen. Der Einfluss der Temperatur wurde auf der Basis der Messwerte von 15 Thermometern berechnet. Der thermische Ausdehnungskoeffizient wurde mit $10^{-5}/^\circ\text{C}$ festgelegt. Im Modell wurde auch die Foundation mitberücksichtigt, wobei der Fesselastizitätsmodul identisch mit demjenigen des Betons (15.6 kN/mm^2) angesetzt wurde.

Die irreversiblen Verschiebungen, die vor der Aufnahme der Temperaturmessungen und vor der Nullrechnung aufgetreten sind, wurden mit einer Konstanten berücksichtigt.

Der Vergleich der vorausgesagten mit den beobachteten Verschiebungen ist in der Figur 18 dargestellt.



Figur 18 – Vergleich zwischen der mit der deterministischen Methode vorausgesagten und der gemessenen Verschiebung.

Oben: Radialverschiebung im Zentrum der Mauerkrone.

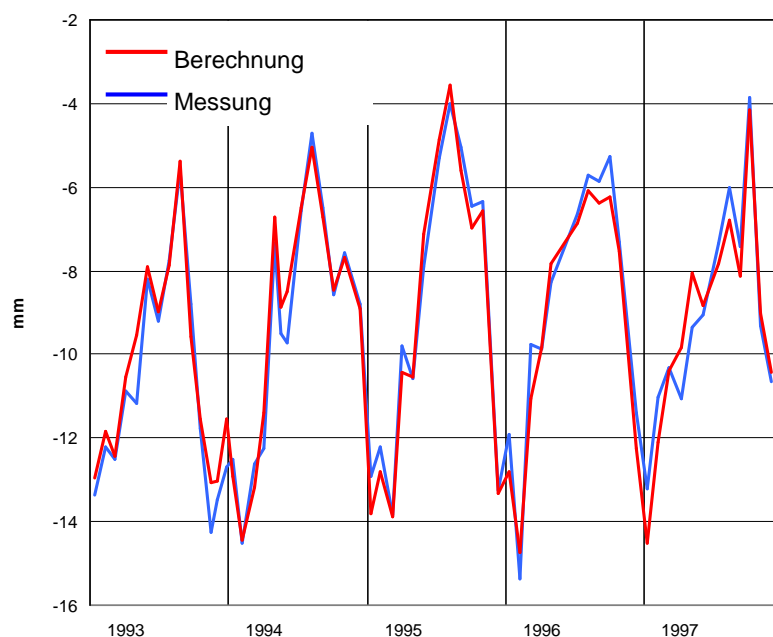
Unten: Differenz zwischen der berechneten und der gemessenen Verschiebung.



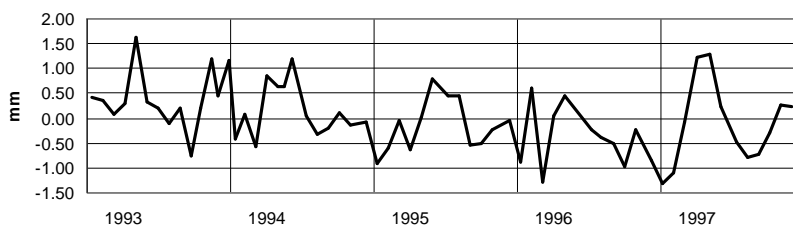
Die mit Hilfe der deterministischen Methode berechneten Verschiebungen zeigen keine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Die Standardabweichung beträgt 1.52 mm für eine maximale Amplitude der Verschiebungen von 13 mm. Grosse Differenzen sind insbesondere für extreme Verschiebungen festzustellen; dies weist darauf hin, dass der Elastizitätsmodul nicht richtig eingeschätzt wurde. Um eine Verbesserung zu erreichen, wurde wie nachstehend beschrieben die hybride Methode angewendet.

Hybride Methode

Nach 15 weiteren Betriebsjahren wurde das ursprüngliche Voraussagemodell mit einer multiplen Regression verbessert. Aus der Regression wurden neue Faktoren für den Einfluss der Lastfälle und eine neue Anfangskonstante gewonnen. Die Resultate für den neuen Vergleich der vorausgesagten und der beobachteten Verschiebungen sind in der Figur 19 dargestellt.



Figur 19 – Vergleich zwischen der mit der hybriden Methode vorausgesagten und der gemessenen Verschiebung.



Oben: Radialverschiebung im Zentrum der Krone.

Unten: Differenz zwischen der berechneten und der gemessenen Verschiebung.

Die mit Hilfe der hybriden Methode berechneten Verschiebungen zeigen eine bessere Übereinstimmung mit den gemessenen Werten als bei der deterministischen Methode. Die Standardabweichung beträgt nur noch 0.66 mm, und die grossen Differenzen erscheinen nicht mehr systematisch.



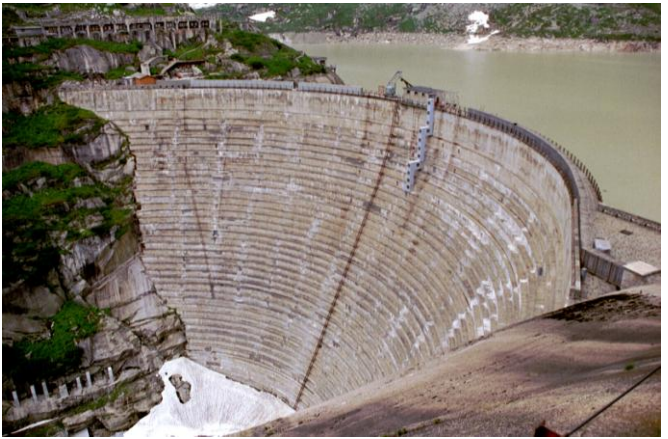
8.2 Statistische Methode (Gewichtsbogenmauer Spitallamm)

8.2.1 Beschreibung des Bauwerks

Die nachfolgenden Informationen sind dem Artikel *Barrages présentant des aspects particuliers* entnommen worden, der von Walter Indermauer im Buch *Barrages suisses, Surveillance et entretien* anlässlich des 15. Internationalen Kongresses Grosse Talsperren in Lausanne veröffentlicht wurde.

Die Talsperre Spitallamm (Figur 20), die sich auf einer Höhe von 2000 m ü. M. befindet, ist Teil der Anlagen der Kraftwerke Oberhasli AG (KWO). In Kombination mit dem Nollen – ein Felssporn mitten im Tal – und der Gewichtsstaumauer Seeuferegg, die sich 300 m weiter östlich befindet, schliesst sie das Aaretal ab und bildet den Grimsel-Stausee.

Die Talsperre und der Hauptteil des Staubeckens befinden sich in den Grano-Dioriten der Grimsel, ein Fels von ausgezeichneter Qualität, wenig verformbar, kompakt in der Tiefe, aber mit einer ziemlich ausgeprägten Spaltenbildung an der Oberfläche.

Name	Spitallamm	
Lage	Grimsel	
Typ	Gewichtsbogen	
Höhe	114 m	
Länge	258 m	
Volumen	340 000 m ³	
Totales Stauvolumen	101x10 ⁶ m ³	
Bau	1926–1932	
Inbetriebnahme	1930–1932	

Figur 20 – Talsperre Spitallamm (Foto A. Fankhauser, 2000).

Messeinrichtung

Die Messeinrichtung hat sich im Laufe der Zeit verändert. Heute besteht sie aus den folgenden Elementen:

- 3 mit Pendeln ausgerüstete Querschnitte. Jedes Pendel ist mit einem gespannten Draht 25 bis 40 m in den Fels verlängert.
- 3 mit 4 bis 7 Druckdosen ausgerüstete Messquerschnitte, die den Auftrieb am Kontakt Beton – Fels und in der Tiefe messen.
- 35 Messstellen zur Kontrolle der Drainagewassermenge, die aus den Bohrungen in den Vorbeton des wasserseitigen Paraments austritt.
- 1 Messstation zur Bestimmung der totalen Drainage- und Sickerwassermenge.
- 15 Invar-Drahtpaare, welche die Messung der relativen Verschiebung zwischen Vor- und Massenbeton erlauben.
- 4 Messgeber zur Bestimmung der Temperatur im Innern der Talsperre.



- 1 Messstation zur Luft- und Wassertemperaturmessung.
- 1 geschlossener Polygonzug im mittleren Kontrollgang, welcher mit Bezugspunkten im Fels verbunden ist.

8.2.2 Vergleich der gemessenen und vorausgesagten Verschiebungen

Die radialen und tangentialen Verschiebungen, die relativen Verschiebungen zwischen Vor- und Massenbeton sowie der Auftrieb sind Gegenstand eines kontinuierlichen Vergleiches zwischen Beobachtung (Messung) und Voraussage (Berechnung). Im Folgenden wird nur der Vergleich der radialen Verschiebungen dargestellt. Er basiert auf der Gleichung 21b:

$$P(t, h, s) = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4 + \\ a_5 e^{-t} + a_6 t + \\ a_7 \cos s + a_8 \sin s + a_9 \sin^2 s + a_{10} \sin s \cos s$$

Dabei bezeichnet h den Wasserstand, s die Jahreszeit (variiert entsprechend der Gleichung 22 zwischen 0 für den 1. Januar und 2π für den 31. Dezember) und t die Zeit.

Die Tabelle 2 zeigt die Daten für die Kalibrierungsperiode und für die Kontrollperiode. Von links nach rechts geben die Kolonnen folgende Daten wieder:

- das Datum der Messung,
- den Wasserstand,
- die Messwerte der radialen Verschiebung (Indikator) für drei Messquerschnitte (linke Flanke, Scheitel und rechte Flanke),
- die Lufttemperatur,
- die Jahreszeit,
- den normalisierte Wasserstand,
- die normalisierte Zeit und
- die normalisierte Lufttemperatur.



Bemerkung 1: Die statistische Analyse beginnt am 06.01.86

Bemerkung 2: Die Kalibrierungsperiode endet 1993

Bemerkung 3: Die Kontrollperiode beginnt 1994

Datum	See-stand	Linke Flanke		Scheitel						Rechte Flanke		Luft-Temp.	Tag (trig) s	Norm. Seestand h	Norm. Jahr t	Norm. Lufttemp. T _{air}
		1898	1866.3	1910.5	1899.1	1888.1	1866.3	1842.3	1818.3	1897.9	1866.3					
06.01.86	1894.04	-0.51	-0.70	1.15	5.30	4.60	3.85	2.35	0.95	1.70	0.50	-4.99	0.09	0.74		-0.94
10.02.86	1884.70	-0.76	-0.95	1.30	4.45	4.00	3.30	2.00	0.85	1.45	0.25	-5.29	0.70	0.57	0.01	-0.98
10.03.86	1872.44	-1.46	-1.30	0.25	2.40	2.40	2.05	1.30	0.60	0.65	-0.15	-7.09	1.44	0.35	0.02	-0.82
07.04.86	1870.14	-1.81	-1.40	-2.25	1.50	1.80	1.75	1.10	0.55	0.60	0.00	-1.74	1.66	0.31	0.03	-0.52
05.05.86	1870.94	-1.96	-1.40	-4.70	0.45	1.35	1.55	0.95	0.50	0.20	-0.05	1.54	2.14	0.33	0.04	-0.09
05.06.86	1876.76	-2.46	-1.45	-9.65	-1.25	0.10	1.10	0.80	0.40	0.05	-0.15	5.59	2.67	0.43	0.05	0.43
03.07.86	1894.64	-2.76	-0.95	-15.20	-2.85	0.40	2.25	1.65	0.75	-0.40	0.05	8.61	3.16	0.75	0.06	0.82
04.08.86	1904.71	-1.61	-0.45	-13.45	0.75	2.90	3.80	2.50	1.10	0.70	0.65	10.01	3.71	0.93	0.07	1.00
01.09.86	1907.08	-0.86	0.30	-8.40	2.90	4.05	4.25	2.75	1.20	1.25	0.65	8.89	4.19	0.98	0.08	0.86
23.09.86	1907.54	-0.71	-0.25	-7.05	3.45	4.30	4.45	2.90	1.20	1.25	0.65	6.65	4.57	0.98	0.09	0.57
09.10.86	1908.06	0.00	0.30	-7.65	3.85	4.45	4.50	2.90	1.25	1.25	0.65	4.55	4.84	0.99	0.09	0.29
11.11.86	1908.80	-0.16	-0.30	-3.90	5.30	5.25	4.70	2.95	1.20	1.70	0.60	-0.03	5.41	0.95	0.10	-0.30
08.12.86	1901.86	-0.21	-0.45	-2.70	5.55	5.20	4.55	2.80	1.15	1.65	0.55	-3.07	5.87	0.88	0.11	-0.69
12.01.94	1888.50	-0.71	-1.00	-10.25	1.80	2.45	2.70	1.75	1.10	0.55	-0.25	-5.19	0.20	0.64	0.97	-0.97
15.02.94	1875.04	-1.06	-1.25	-10.75	0.60	1.35	1.60	1.05	0.80	0.40	0.30	-5.17	0.78	0.40	0.98	-0.96
17.03.94	1866.62	-1.56	-1.40	-12.90	-1.40	0.00	0.75	0.55	0.65	-0.05	-0.45	-3.61	1.30	0.25	0.99	-0.76
19.04.94	1866.98	-1.66	-1.45	-15.30	-1.60	-0.05	0.75	0.60	0.65	0.10	-0.45	-0.43	1.87	0.25	1.00	-0.35
19.05.94	1874.20	-2.16	-1.50	-19.80	-3.15	-0.90	0.60	0.65	0.65	-0.40	-0.45	3.38	2.38	0.38	1.01	0.14
15.06.94	1886.20	-2.26	-1.35	-21.70	-3.80	-0.85	1.25	1.00	0.80	-0.65	-0.40	6.80	2.85	0.60	1.02	0.59
15.07.94	1906.42	-1.21	-0.55	-24.40	-0.75	1.80	3.25	2.25	1.20	0.00	-0.10	9.45	3.36	0.96	1.03	0.93
09.08.94	1907.20	-1.41	-0.40	-24.45	-1.35	1.65	3.25	2.30	1.30	-0.15	-0.05	9.98	3.79	0.98	1.03	1.00
09.09.94	1907.68	-0.61	-0.45	-20.65	0.00	2.15	3.30	2.30	1.25	0.15	-0.05	8.19	4.33	0.99	1.05	0.77
21.09.94	1906.82	-0.71	-0.50	-18.05	1.15	2.70	3.50	2.35	1.30	0.35	-0.15	6.89	4.53	0.97	1.05	0.60
21.10.94	1905.20	-0.51	-0.50	-17.50	1.60	2.85	3.40	2.25	1.25	0.35	-0.15	2.86	5.05	0.94	1.06	0.08
16.11.94	1898.48	-0.96	-0.85	-16.45	0.60	1.95	2.75	1.95	1.10	0.25	-0.15	-0.67	5.50	0.82	1.07	-0.38
13.12.94	1896.56	-0.96	-0.95	-14.80	1.35	2.25	2.85	1.95	1.10	0.45	-0.15	-3.51	5.96	0.79	1.08	-0.75

Tabelle 2 – Daten der Kalibrierungs- und Kontrollperiode.

Nach diesem ersten Schritt der Datenaufbereitung kann die statistische Analyse beginnen. Bei dieser Analyse geht es darum, die Werte der anpassbaren Parameter a_j mit Hilfe einer multiplen Regression basierend auf der Methode der kleinsten Quadrate zu bestimmen. Die entsprechende Formel wurde im Kapitel 4 angegeben.

Die Resultate der Regressionsberechnung sind in der Tabelle 3 zusammengefasst. Die Tabelle zeigt die Parameter a_0 bis a_{10} für zehn verschiedene Punkte der Talsperre. Um die Qualität der Korrelation zwischen den gemessenen und den berechneten Werten zu kontrollieren, werden gleichzeitig das Quadrat des multiplen Korrelationskoeffizienten (= Determinationskoeffizient R^2) und die Standardabweichung σ für die Kalibrierungs- und Kontrollperiode¹⁷ ermittelt.

¹⁷ Die hier eingeführte Kontrollperiode ist nichts anderes als ein Zeitabschnitt, während der das kalibrierte Modell angewendet wird, um seine Leistungsfähigkeit zu testen.

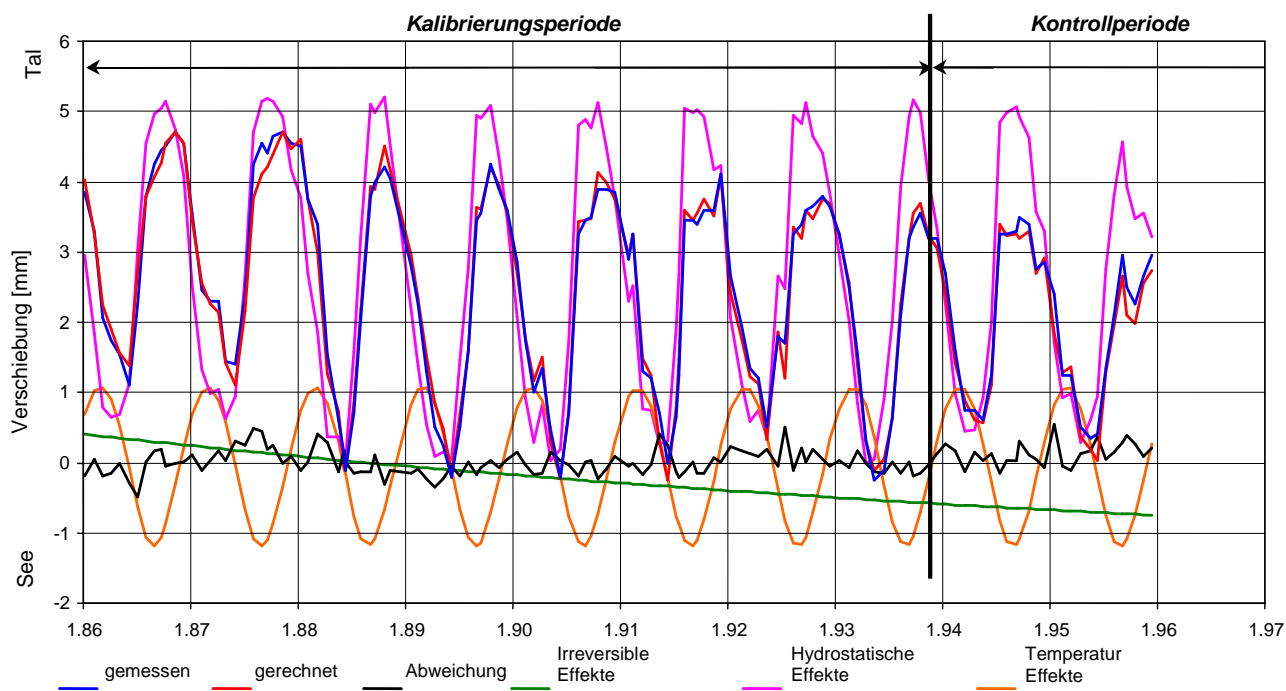


Parameter										
	Linke Flanke 1898.0	Linke Flanke 1866.3	Scheitel 1910.5	Scheitel 1899.1	Scheitel 1866.3	Scheitel 1842.3	Scheitel 1818.3	Scheitel 1910.5	Rechte Flanke 1897.9	Rechte Flanke 1866.3
a_0	-2.0561	-1.2235	-12.2338	-5.0479	-3.6010	-0.7382	0.5535	1.2144	-0.7050	-0.2523
a_1	-0.2434	-0.3255	6.4531	4.1109	3.2678	1.1441	-0.1981	-0.9416	0.7723	0.1828
a_2	0.2336	-0.3022	-7.6205	0.1896	0.4590	-0.2970	-0.7124	-0.5482	-0.0122	-0.4066
a_3	-0.1429	-0.3705	-1.6308	0.4738	3.6671	0.6895	0.4773	-0.1122	-0.0400	-0.3090
a_4	1.1400	1.7128	23.0352	1.6698	-9.7559	4.5765	3.7010	2.2984	3.4459	1.9360
a_5	-1.7222	-0.7401	-50.3557	0.8142	19.2979	-0.5463	-2.1172	-1.9376	-7.0115	-1.9851
a_6	3.1141	0.9964	30.6342	4.6007	-6.3584	0.4776	0.9234	0.7816	5.5235	1.2659
a_7	0.5786	0.2191	2.6188	2.2674	1.7268	0.9589	0.4103	0.1311	0.5963	0.1858
a_8	0.8525	0.1370	6.1455	2.8754	1.5573	0.6029	0.2427	0.0524	0.6701	0.1216
a_9	-0.1615	0.0254	-0.8392	-0.5827	-0.2881	-0.1060	0.0181	-0.0024	-0.2073	0.0022
a_{10}	-0.1280	-0.0566	1.0698	-0.0544	0.0114	-0.0133	0.0059	0.0186	-0.0932	-0.0760
R^2	0.96	0.99	0.97	0.96	0.98	0.98	0.98	0.97	0.93	0.91
σ	0.19	0.06	0.96	0.56	0.31	0.18	0.11	0.05	0.18	0.09
R^2	0.88	0.97	0.93	0.90	0.94	0.97	0.95	0.95	0.76	0.33
σ	0.22	0.07	1.47	0.64	0.34	0.17	0.15	0.05	0.22	0.17

Tabelle 3 – Resultate der statistischen Analyse.

Generell zeigt sich eine sehr gute Korrelation zwischen den gemessenen und berechneten Werten, da der Determinationskoeffizient fast immer Werte nahe bei 1 annimmt.

Als Letztes wird eine grafische Kontrolle der Resultate für die Kalibrierungs- und Kontrollperiode durchgeführt. Die Figur 21 gibt dazu ein Beispiel. Daraus ist gut erkennbar, dass die Beurteilung erheblich erleichtert wird, falls die hydrostatische, die thermische und die irreversible Komponente getrennt dargestellt werden.



Figur 21 – Grafische Kontrolle der Resultate der statistischen Analyse.

Wie in anderen Fällen, in denen ein Sicherheitsfaktor basierend auf der statistischen Gauss-Verteilung und der Standardabweichung einer Grösse definiert wird, kann ein Alarm ausgelöst werden, falls die gemessenen Werte ausserhalb der mit der statistischen Methode geschätzten Werte liegen. In diesem konkreten Fall erfolgt die Alarmierung, sobald die gemessenen Werte mehr als zwei Standardabweichungen von den berechneten Werten abweichen. So können die Messwerte sofort kontrolliert und – falls eine Anomalie festgestellt wird – die notwendigen Massnahmen unverzüglich in die Wege geleitet werden.



Referenzen

- Bianchi M. & Bremen R. 2000: *Health monitoring of arch dams — Recent developments*, International workshop on the present and the future in health monitoring, Bauhaus-Universität Weimar, 3.–6. September 2000.
- Biedermann R. 1980: *Concept de sécurité pour les ouvrages d'accumulation: évolution du concept suisse depuis 1980*, Wasser–Energie–Luft, Baden, 3/4 1997, Seiten 63–72.
- Bonaldi P., Fanelli M. & Giuseppetti G. 1977: *Displacement forecasting for concrete dams*, Water Power & Dam Construction, September 1977, Seiten 42–50.
- Bossoney C. 1985: *Comparaison des observations avec le comportement prévu à l'aide de modèles analytique et statistique*, 15ème Congrès du Comité International des Grands Barrages, Lausanne, Q56–12 1985, Seiten 85–89.
- Bossoney C. 1995: *Knowledge based modelling of dam behaviour with neural networks*, Research and Development in the Field of Dams, Swiss national committee on large dams, Crans–Montana, 1995, Seiten 201–217.
- Breitenstein F., Köhler W. & Widman R. 1985: *Safety control of the dams of the Glockner-Kaprun hydro-electric development*, 15ème Congrès du Comité International des Grands Barrages, Lausanne, Q56–R59 1985, Seiten 1121–1134.
- Bremen R. & Bianchi M. 2000: *Möglichkeiten und Grenzen deterministischer Modelle zur Überwachung von Verformungen an Betonsperren*, Symposium Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen, Graz, Oktober 2000.
- CNSGB – Comité national suisse des grands barrages 1987: *Dispositif d'auscultation des barrages*, 1987.
- CNSGB – Comité national suisse des grands barrages 1993: *L'informatique dans la surveillance des barrages*, 1993.
- CNSGB – Comité national suisse des grands barrages 1997a: *Mesures de déformations géodésiques et photogrammétriques pour la surveillance des ouvrages de retenue*, 1997.
- CNSGB – Comité national suisse des grands barrages 1997b: *Surveillance de l'état des barrages et check lists pour les contrôles visuels*, 1997.
- Crépon O. & Lino M. 1999: *An analytical approach to monitoring*, International Water Power & Dam Construction, June 1999, Seiten 52–54.
- Guedes Q.M. & Coelho P.S.M. 1985: *Statistical behaviour model of dams*, 15ème Congrès du Comité International des Grands Barrages, Lausanne, Q56–R16 1985, Seiten 319–334.
- Hasegawa T. & Murakami A. 1985: *Technique of monitoring for dam safety and its application*, 16ème Congrès du Comité International des Grands Barrages, San Francisco, C2 1988, Seiten 929–954.
- Hattingh L.C. & Oosthuizen C. 1998: *Surveillance of Gariiep dam using neural networks*, in *Dam Safety*, Berga (ed.), Balkema, Rotterdam, 1998, Seiten 981–988.
- Hepp P. 1998: *Moderne Leittechnik in der Talsperrenüberwachung*, Wasser–Energie–Luft, 9/10 1998, Seiten 235–239.
- Jinping H. & Zhenzhao L. 1998: *The mathematical model of dam safety monitoring based on multiple survey points*, in *Dam Safety*, Berga (ed.), Balkema, Rotterdam, 1998, Seiten 989–995.



- Le May Y., Nury C., Douillet G. & Lefèvre C. 1985: *Auscultation des barrages d'électricité de France*, 15ème Congrès du Comité International des Grands Barrages, Lausanne, Q56–R78 1985, Seiten 1529–1553.
- Leroy R. & Hagin B. 2000: *Système AuscuBar V2.0 d'acquisition, d'archivage et de contrôle des mesures d'auscultation de barrages*, Energie Ouest Suisse, Février 2000.
- Lombardi G. 1992: *L'informatique dans l'auscultation des barrages*, Wasser–Energie–Luft, Baden, 1/2 1992, Seiten 2–8.
- Lombardi SA: *MIC – Logiciel pour l'auscultation de barrages*.
- Loudière D., Planaud A., Duranton R., Lassagne J., Bertrand J., Chabal J.-P. & Tardieu B. 1985: *Auscultation de cinq barrages en remblai*, 15ème Congrès du Comité International des Grands Barrages, Lausanne, Q56–R80 1985, Seiten 1565–1588.
- Lugiez F., Beaujoint N. & Hardy X. 1970: *L'auscultation des barrages en exploitation au service de la production hydraulique d'Electricité de France – Des principes aux résultats*, 10ème Congrès du Comité International des Grands Barrages, Montréal, Q38–R33 1970, Seiten 577–600.
- Montgomery D.C., Peck E.A. & Vining G.G. 2001: *Introduction to linear regression analysis*, 3rd edition, John Wiley, 2001.
- O'Rourke J.E., Black J.H., Saraf C.L. & Morales Arnao B., 1985: *Field monitoring and predictive model for the Tablachaca Dam landslide*, 15ème Congrès du Comité International des Grands Barrages, Lausanne, C5 1985, Seiten 1125–1140.
- Post, G. 1985: *Auscultation des barrages et de leurs fondations*, 15ème Congrès du Comité International des Grands Barrages, Lausanne, Rapport général Q 56 1985, Seiten 1623–1727.
- Silva Gomes A.F. & Silva Matos D. 1985: *Quantitative analysis of dam monitoring results: State of the art, applications and prospects*, 15ème Congrès du Comité International des Grands Barrages, Lausanne, Q56–R39 1985, Seiten 749–761.
- Singh V.P. & Li Z. 1992: *Modelling the deformation of concrete dams*, in *Geomechanics and water engineering in environmental management*, R.N. Chowdhury (ed), Balkema, 1992, Seiten 169–192.
- Stucky A. & Derron M. 1957, *Problèmes thermiques posés par la construction des barrages-réservoirs*, Science et technique, Lausanne, 1957.
- Widman R. 1967: *Evaluation of deformation measurements performed at concrete dams*, 9ème Congrès du Comité International des Grands Barrages, Istanbul, Q34/R38 1967, Seiten 671–676.
- Willm G. & Beaujoint N. 1967: *Les méthodes de surveillance des barrages au service de la production hydraulique d'Electricité de France – Problèmes anciens et solutions nouvelles*, 9ème Congrès du Comité International des Grands Barrages, Istanbul, Q34/R30 1967, Seiten 529–550.